

博士論文

木材の割裂破壊耐力推定のための基礎的研究

落合 陽

目次

1. 緒言	1
1.1. はじめに	2
1.2. 国内外の設計における割裂破壊の取り扱い	4
1.3. 割裂破壊についての研究	7
1.4. 割裂破壊メカニズム解明のための検討事項	9
1.5. 本論文の位置付け	11
2. CT試験による割裂発生メカニズム	12
2.1. 目的	13
2.2. 実験	14
2.2.1. 試験体および試験方法	14
2.3. 結果と考察	16
2.3.1. 試験結果および破壊性状	16
2.4. FEM解析による検証	19
2.5. FEM解析結果と考察	20
2.6. FEM解析によるケーススタディ	24
2.6.1. 解析方法	24
2.6.2. 解析結果	26
2.7. CT試験体の割裂耐力推定式の提案	37
2.7.1. 耐力推定式の考え方	37
2.7.2. CT試験体の割裂耐力推定式	39
2.7.2.1. 開口肩口の変形量	39
2.7.2.2. 開口肩口での仕事量と破壊エネルギーの釣り合い	40
2.8. まとめ	41
3. 樹種の違いを考慮した割裂破壊パラメータの算出とメカニズムの検証	42
3.1. 目的	43
3.2. 実験	44
3.2.1. 試験体および試験方法	44
3.3. 結果と考察	47
3.3.1. 破壊性状	47
3.3.2. 荷重と変形の関係	49
3.4. 割裂破壊定数と密度の比較	51
3.4.1. CT試験による割裂破壊定数の算出方法	51
3.4.2. 割裂破壊定数と密度の比較	52
3.5. 計算値と実験値の比較	53
3.6. まとめ	54

4. 接合具の曲げを考慮した縦割裂試験とその考察.....	55
4.1. 目的	56
4.2. 実験	57
4.2.1. 試験体及び試験方法.....	57
4.3. 結果と考察	60
4.3.1. 破壊性状	60
4.3.2. 荷重と変形の関係.....	64
4.4. 割裂破壊の各パラメータによる影響.....	66
4.4.1. 樹種による影響	66
4.4.2. ドリフトピン径による影響.....	66
4.4.3. 端距離による影響.....	67
4.4.4. 縁距離による影響.....	69
4.4.5. 材厚による影響	71
4.5. まとめ	73
5. 支圧応力度による縦割裂耐力推定手法の提案.....	74
5.1. 目的	75
5.2. 縦割裂試験の解析.....	76
5.2.1. 解析モデル	76
5.2.2. 解析結果	79
5.3. 解析結果と割裂発生メカニズムの提案.....	82
5.4. 縦割裂耐力推定手法の提案.....	94
5.4.1. 簡易計算式による縦割裂耐力推定.....	95
5.4.2. 弾塑性フレーム解析による縦割裂耐力推定.....	100
5.4.3. 実験値と推定値の比較.....	102
5.5. まとめ	105
6. 結言	106

謝辞

参考文献

付録

1. 緒言

1.1. はじめに

平成 22 年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律¹⁾」が施行され、木造建築物は従来の住宅規模から事務所や学校・役所などの公共建築物といった中大規模建築物にスケールアップする動きが活発になっている。建築規模の巨大化により、規模によっては従来の壁量計算や許容応力度計算といった中小地震を想定した設計法よりも高度な、大地震を想定した保有水平耐力計算も求められる可能性がある。保有水平耐力計算は靱性型の設計法であり、建築物の塑性変形能力が重要な意味合いを持つが、木造建築物は塑性変形能力の評価が難しい。なぜなら、木材は自然由来の材料であるがゆえに強度性能のばらつきがあり、単一部材でさえ破壊モードが一定でないために、建物全体で崩壊メカニズムを予測することが困難であるためである。そのため、平成 12 年建告 1452 号²⁾や平成 13 年国交告 1024 号³⁾に規定されている木材及び木質材料の基準強度は、実験によって得られた強度値にばらつき係数や、低減係数を適宜乗じることで安全率を見込んでおり⁴⁾、その数値を用いて設計を行うことで脆性的な木材の破壊を概ね回避することができるとしている。しかし、ここで問題となるのが木材の割裂破壊である。

木材の割裂破壊は“木材が横引張力やせん断力により繊維と直交方向に裂かれる破壊現象”と定義できる。割裂破壊はせん断破壊と比較されることが多いが、せん断破壊はあくまでもせん断応力による破壊であり、割裂破壊は必ずしもせん断応力によって起きる破壊ではなく、横引張力やせん断力によって繊維を裂かれるような破壊現象であると本研究では定義している。割裂破壊は木造建築物の主に接合部でよく観察され、例えば、鋼板挿入ドリフトピン接合部が荷重を受けた際に円孔から生じる割裂破壊(Photo 1.1)や腰掛け鎌継ぎ接合部が鉛直荷重を受けた際に腰掛部分から生じる割裂破壊(Photo 1.2)、その他には、テーパ梁が曲げ応力を受けた際のテーパ部からの割裂などが実際に起こりうる破壊として知られている。割裂破壊は脆性破壊現象で望ましくない破壊形態である上、そのメカニズムや発生条件が依然として不明であり、多くの研究者とともに、メカニズム解明を目指して研究を行っている。



Photo 1.1 ドリフトピン孔から生じる割裂破壊

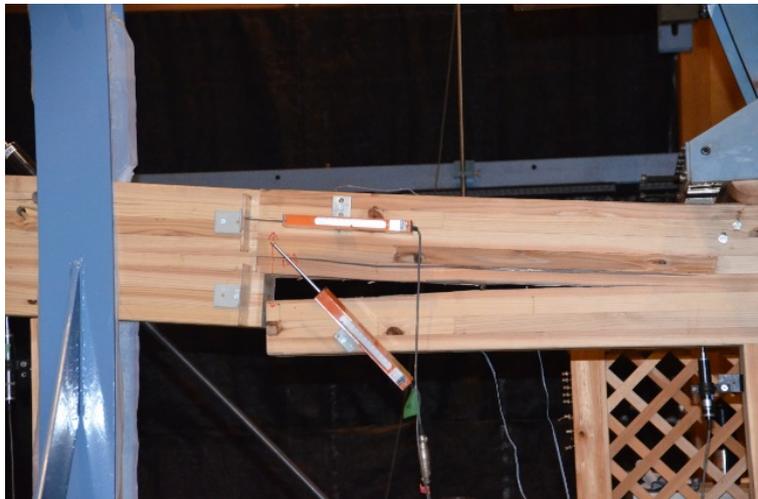


Photo 1.2 腰掛け鎌継ぎ接合部における割裂破壊

1.2. 国内外の設計における割裂破壊の取り扱い

接合部については、国内では「木質構造設計規準・同解説⁵⁾」に則って設計を行うのが一般的である。ボルトやドリフトピン・ラグスクリュー接合部においては、まず十分な端距離・縁距離・接合具径間距離を繊維方向に対する加力角度に従って Table 1.1 のように確保することとなる。この数値は割裂破壊のみならず、せん断破壊・集合型せん断破壊などを考慮した数値となっており、その距離の妥当性についても検証されている^{例えば6)}。一方で、それらと比べ小径である釘や木ねじは Table 1.2 のような最小間隔を定めている。その他にもグルーラムリベット接合についても最小間隔のルールがある。

Table 1.1 せん断を受けるボルト・ドリフトピンの配置 (d : 接合具径, l : 主材厚)⁵⁾

距離・ 間隔	加力方向		
	繊維方向	繊維に直角方向	中間角度
s	7d以上	3d ($l/d=2$) 3d~5d ($2 < l/d < 6$) 5d以上 ($l/d \geq 6$)	角度に応じて繊維方向と繊維に 直角方向の値の中間値をとる
r	3d以上	4d以上	
e_1	7d以上 (荷重負担側) 4d以上 (荷重非負担側)	7d以上	
e_2	1.5d以上, $l/d > 6$ のときは1.5d以上かつ $r/2$ 以上	4d以上 (荷重負担側) 1.5d以上 (荷重非負担側)	

Table 1.2 せん断を受ける釘・木ねじの配置 (d : 接合具径)⁵⁾

加力が繊維方向の場合	加力方向	釘間隔	12d	
		釘側圧の作用する側の端距離	15d	
	加力に直角方向	釘列間隔	5d	
		縁距離	5d	
加力が繊維に直角方向の場合	加力方向	釘間隔	8d	
		縁距離	8d	
	加力に直角方向	同一繊維上釘間隔	10d	
		縁距離	10d	

これらの間隔を確保した上で、(1.1)式に示す設計式を用いて割裂耐力を推定し、設計を行うことが一般的である。この設計式は Van der Put と Leijten の研究⁷⁾を基に、安村が改良を加えた式⁸⁾である。

$$P_{uw\perp} = 2C_{\gamma} l \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{h}}} \quad (1.1)$$

ここで、 $P_{uw\perp}$ ：割裂による終局耐力(N)、 C_{γ} ：割裂破壊定数(N/mm^{1.5})、 h ：材せい(mm)

h_e ：加力側材端から接合具までの距離(mm)、 l ：主材厚(mm)

割裂破壊定数はエネルギー開放率とせん断弾性係数の積をパラメータとした定数である。

$$C_{\gamma} = \sqrt{\frac{G \cdot G_c}{0.6}} \quad (1.2)$$

ここで、 G ：せん断弾性係数(N/mm²)、 G_c ：エネルギー開放率(N/mm^{1.5})

割裂での終局耐力は、その割裂破壊定数と接合部の各部寸法によって定まり、接合部に生じるせん断力がそれを下回るように設計することで割裂破壊を防いでいる。

(1.1)式は割裂破壊メカニズムが明らかではない中、破壊力学に基づいて立式された理論式であるが、後述する課題もあり更なる改良が求められている式である。

欧州構造基準 Eurocodes の中の木質構造設計規準である Eurocode5⁹⁾においても接合具の最小間隔の規定がある上で、割裂耐力の推定には同様の式が採用されている。割裂破壊定数が接合形式によって異なる点(パンチングメタルプレートであるか、ファスナーであるか)や接合具両側のせん断力に対する設計をしている点が国内での推定式と異なっている。

一方、米国の NDS¹⁰⁾(National Design Specification for Wood Construction)では割裂を防止するため十分な縁距離と端距離を確保した設計にするように記載されており、具体的な推定式については記載がない。

各国に共通しているのが、全て割裂破壊はダウエル型(曲げ降伏型)接合具を用いた設計の場合にのみ言及されている点で、木質構造において最も多用されている曲げ降伏型接合具を使用した接合部設計において割裂破壊は非常に悩ましく、各国共通の課題であると言えよう。

1.3. 割裂破壊についての研究

割裂破壊の研究は古くから行われており、今から 60 年近く前に竹山は著書¹¹⁾の中で割裂破壊について触れており、木材の破壊の急所となることを述べている。割裂破壊の研究は大きく分けて①材料の基礎物性的見地から現象を捉える、②材料力学から破壊メカニズムや発生条件を明らかにする、③破壊力学から破壊メカニズムや発生条件を明らかにする、といった研究が行われている。

① 材料の基礎物性的見地からの研究

飯塚は切り欠きを持つ梁材の曲げ試験を行い^{12), 13)}、「曲げを受ける木材の引張側に尖鋭な切欠がある場合、その破壊は切欠隅から繊維に沿う割裂によって始まり、終局強度をきわめて低下させる」ことを痛感し、割裂強度を測定するため、材端に円型に切り欠きを設けた小試験体について、スギについて年輪傾角、心辺材、端距離をパラメータに割裂試験を行った¹⁴⁾。スギについては早晚材や心辺材の差が少なく、有意差はなかったが、端距離の影響は大きく、端距離を長くすると割裂強度が向上するが、ある値を超えると一定になることを確認した。

鈴木らは割裂破壊メカニズムを、アコースティック・エミッション法を用い解明しようとした¹⁵⁾。液体アンモニア処理を行った試験体と未処理の試験体について年輪傾角をパラメータに割裂試験を行った。年輪傾角によって、AE 波の振幅分布のピークが異なることを確認した。

青木らは繊維方向の割裂を対象に密度・含水率・縦弾性係数・年輪幅・年輪傾角・端距離・加力速度をパラメータに割裂破壊強度に対する重要因子が端距離となることを再確認し、次いで密度の影響が大きく端距離が及ぼす影響度の半分程度になることを確認した¹⁶⁾。

またミクロスケールで割裂破壊を解明しようとする研究もあり、佐伯らは割裂のみならず、木材の破壊について破面を電子顕微鏡で観察し、マイクロレベルでの破壊モードを場合分けし、定義した¹⁷⁾。

このように材料の基礎物性として、割裂破壊について一定の傾向が見られることが分かってきたが、試験体形状、特に特異点を持ち応力集中が極端な場合にどのような応力が生じて、一体どの程度の応力に達した場合に割裂が発生するか、という点が明らかにならないため、材料力学もしくは破壊力学を用いて、その条件を明らかにしようとした動きが見られる。

② 材料力学的アプローチによる研究

杉山らは初等材料力学を用い梁下端に切り欠きを有する梁の応力状態を仮定し、実験で検証することで割裂破壊の発生条件の解明を試みた¹⁸⁾。

しかし、杉山らのモデルは応力度の影響範囲が定義できないという問題があり、桑村はそれを改良し、切り欠き梁の応力度の改良モデルを提案した¹⁹⁾。切り欠き梁のように特異点を持つ構造物は形状や仕上げの精度によって応力度が極端に変化するため、初等力学では評価が難しい。そのため、テーパー梁のような特異点を持たずに割裂が生じる構造物の応力度の一般解を導き、実験で検証を行い、割裂破壊が発生する応力度が木材の引張強度とほぼ同値になることを確認した^{20), 21)}。

その他にも、大河平は正方格子モデルで JIS 試験体、ASTM 試験体などの小試験体の応力状態を仮定し、割裂破壊の発生条件の解明を試みた²²⁾。

また、大草は有限要素法解析を行い、JIS 試験体の応力状態について大河平のモデルと比較検討を行った²³⁾。

これらの研究はモデルの簡易化のため、全て平面応力状態を仮定し、二次元問題として捉えられている。材料力学で割裂現象を捉える場合、桑村の研究で裏付けされているように、最大応力度が引張強度に達する時点で割裂が開始し、それを割裂の発生条件とするのが適当であると考えられる。

③ 破壊力学的アプローチによる研究

材料力学ではき裂先端の応力集中の定義が難しいため、破壊力学的アプローチではエネルギー量に注目して割裂メカニズムの解明を試みている例が多い。

木質構造設計規準や Eurocode5 の元論文となっている Van der Put らの研究⁷⁾は繊維直交方向に加力を受ける単一ボルト接合部の円孔縁からの割裂破壊について破壊力学を用いて理論式を導いている(Fig. 1.1)。この理論式では、エネルギー開放率がパラメータとして用いられているが、木材においてエネルギーを媒介とするこれらパラメータを算出することは難しい。なぜなら、破壊力学パラメータを算出するための試験法が確立されていないからである。

そこで安村らは、割裂破壊を脆性破壊現象と捉え弾性破壊力学を適用し、有限要素法解析から破壊力学パラメータを算出する方法を提案した²⁴⁾。さらに実務設計上より汎用性の高い形として、せん断弾性係数とエネルギー開放率の積からなる割裂破壊定数というパラメータを提案した²⁵⁾。割裂破壊定数は岩崎らにより比重から算出できる回帰式も提案されている²⁶⁾。

一方で、神戸らは木材における破壊力学パラメータの試験法である CT 試験や曲げ型割裂試験の実施方法やデータの評価手法を比較した上でまとめ、このことにより J 積分値やエネルギー開放率の評価も簡便にできるようになった²⁷⁾⁻²⁹⁾。

また野口らは仮想クラックモデルを用いた割裂破壊の詳細なモデル化を行い、より詳細な割裂耐力推定式を提案した³⁰⁾。

ただ、これらの破壊力学的アプローチも「予見可能なき裂が存在し、かつそこから破壊するならば」ということを前提としている点で、割裂問題のすべてを解決できるわけではないと指摘されており¹⁹⁾や、そもそもエネルギー量は樹種の違いによる差異も大きく、基礎物性の実験データを収集していくことが大変重要である。

1.4. 割裂破壊メカニズム解明のための検討事項

前述の通り、木質構造設計規準において割裂破壊強度の推定式が提案されているが⁵⁾、その推定式は適用条件が限定されており、汎用的な耐力推定式を提案するためには様々な問題を解決する必要がある。

木質構造設計規準で採用されている Van der Put らの推定式⁷⁾は梁せい $h(\text{mm})$ の梁材に縁距離 $ah(\text{mm})$ の位置に配置された単一のボルトがせん断力を負担する時を想定し、Fig. 1.1 の上図のようにモデル化している。梁材はボルト位置を対称軸に左右対称と考え、対称軸に対して片側を取り出したのが Fig. 1.1 の下図である。下図はボルト位置にせん断力 $V(\text{N})$ 、梁材にモーメント $M(\text{N} \cdot \text{m})$ が作用し、非加力側材端に $M_2(\text{N} \cdot \text{m})$ 、加力側材端に $M_1(\text{N} \cdot \text{m})$ が分配される状態を表している。このモデルを基に変形量を算出し、エネルギー量の釣り合いからせん断力 $V(\text{N})$ の推定式を導いている。

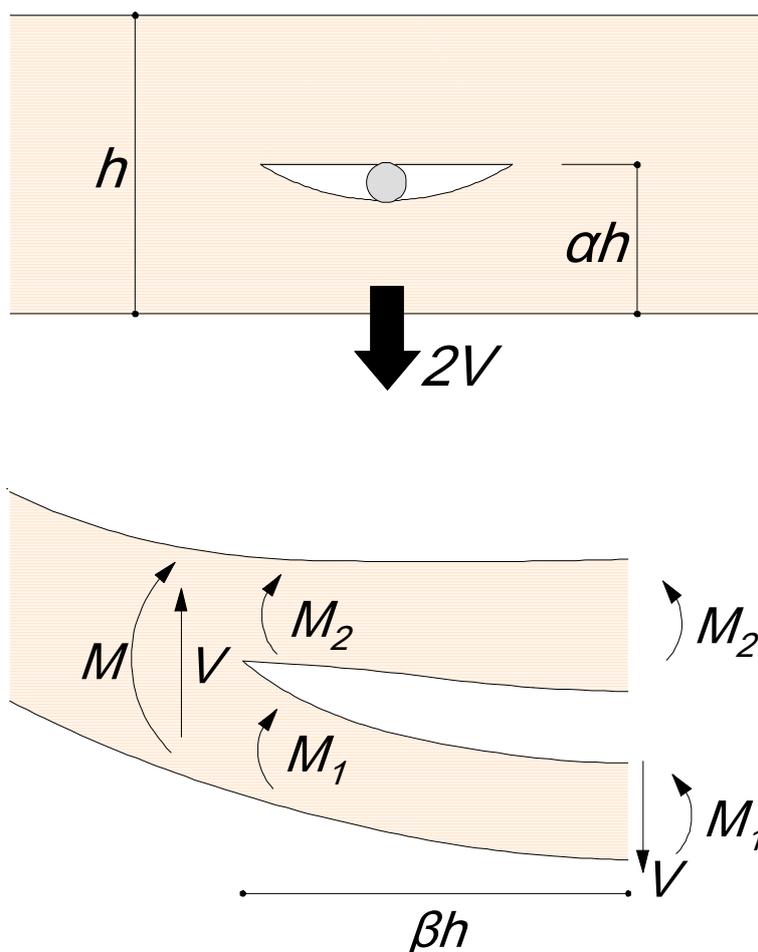


Fig. 1.1 Van der Put 提案式の概念図⁶⁾

問題点 1 : 割裂破壊においてどのような応力が発生し、どの程度に達すれば破壊するのか。

まず、割裂破壊の発生条件について、一般的には以下の2つのパターンで考えられている。

既往の研究より、特異点における引張の応力集中が引張強度に達した時点で割裂破壊を起こし、急激に荷重が低下すると考えるのが妥当であるようである。すなわち、応力集中時の応力度 $\sigma_t = F_t$ に達した時点で破壊が起こるという基礎的な材料力学に則った考え方である。特異点での応力集中は木材の仕上げ、形状に大きく左右されるため、理論的に定義することは難しい。

一方で、破壊力学では物体の持つエネルギー量の増減により破壊を定義しているため、木材の仕上げや形状に依存しない。割裂破壊によって新しい面を作るのに必要な破壊エネルギーが、荷重と変形の積からなる仕事量と同値になった時点で破壊が生じると考えられている。

実験室での単純な試験レベルでは各研究者が提案している推定式と良好な一致が見られるが、実際の構造物のような複雑な応力状態となる場合、推定式を単純に適用しても、破壊強度を予測することは難しい。

その他にも、以下のような問題点が存在する。

問題点 2 : 複数の接合具から構成される場合の接合具間距離を考慮した推定ができない。

問題点 3 : ボルトが完全剛体となる場合を想定しており、塑性変形が生じる場合の推定ができない。

問題点 4 : 接合具がビスや釘のように材を貫通しない場合の推定ができない。

問題点 5 : 加力方向が繊維直交方向以外の場合の推定ができない。

問題点 6 : 端距離の影響が考慮されていない。

問題点 7 : 比重をパラメータとしているが、異樹種間の破壊強度の違いが考慮されていない。

木質構造設計規準における割裂耐力推定式は単一のボルト接合部が繊維直交方向に加力を受けた場合を想定しており、実際の設計では問題点2~6に示すような影響が複雑に関わるため、実情に沿った割裂耐力の推定は現状不可能である。

また、鋼板添え板ボルト接合部などでこれらをパラメータとした研究も行われているものの³¹⁾⁻³⁷⁾、それらの目的は接合部のせん断耐力や終局耐力を推定することを主眼に置かれており、破壊状況について言及されているものは少なく、割裂耐力推定式という形では一般化されていない。これからはこのような要因を考慮した推定式が提案されることが望まれる。

1.5. 本論文の位置付け

このように木材の割裂破壊の耐力推定法提案には未だに解決すべき問題が多く、その原因は発生メカニズムが不明であるためだと考えられる。先述の通り、木材の割裂破壊は“”と定義することができるが、その耐力推定法を提案するためには構造体が加力によって耐力発現し、割裂破壊が発生し耐力が低下するまでの割裂メカニズムを明らかにすることが最も重要である。

その課題の解決のため、本論文の前半に当たる第2章・第3章では、製材を用いたコンパクトテンション試験(CT試験)を実施し、後半の第4章・第5章では、鋼板添え板ドリフトピン接合部を想定した繊維方向荷重時の割裂試験(縦割裂試験)を実施し、考察および検証を行った。

CT試験は、横引張力のみによって割裂を生じさせる試験法であり、主に木材の繊維直交方向に荷重が加わる場合の割裂破壊を想定した試験法である。この試験法は先述の van der Put による理論ではボルト接合部を想定しているが、CT試験は試験体に設けたスリットから割裂破壊を起こすため、割裂の発生箇所が明確であることや加力が横引張力のみであることから、割裂破壊現象のメカニズムを考察しやすいのではないかと考えた。

一方で、縦割裂試験は、せん断力を主応力とした荷重によって割裂を生じさせる試験法であり、主に木材の繊維方向に荷重が加わる場合の割裂破壊を想定した試験法である。繊維方向荷重時の割裂耐力の推定法として一般的に用いられているものは未だになく、その耐力推定手法を提案する事は重要であると考えた。

以上をまとめると、横引張力による繊維直交方向の割裂及び、せん断力による繊維方向の割裂を発生させる試験を行い、それぞれの試験によって得られた結果を考察し、割裂破壊のメカニズムを明らかにし、耐力推定手法を提案することを本論文の目的としている。

2. CT試験による割裂発生メカニズム

2.1. 目的

割裂破壊は木質材料の固有の現象として一般的には知られているが、その実況は材料工学におけるき裂現象に近い。き裂の研究は金属材料で造られた溶接構造船のき裂進展事故を機に発展した経緯^{1),2)}もあり、金属材料を中心に発展してきた。本章の表題でも触れているコンパクトテンション試験(以下、CT 試験)は、中央にスリットを設けた試験体に、横引張力を加えることでき裂を発生させる試験法で、き裂進展の抵抗値である破壊靱性を計測することができ、ASTM³⁾や JSME⁴⁾などで試験方法及び破壊靱性の算出方法が規格化されている。木材を試験体とした横引張力によって起こす破壊靱性試験はCT試験の他にもDCB試験や三点曲げ試験^{5),6)}などによって算出する方法が提案されている。木材のCT試験は三橋ら⁷⁾や神戸ら^{8),9)}が研究を行っており、特に神戸らによって、試験方法や破壊靱性の算出方法がまとめられている。これらの研究により、試験体形状を調整することで安定的に破壊靱性値を算出できることも分かっている。そのため、本試験では比較的試験体が小さく試験が行いやすいことや、安定的に破壊靱性を算出できることからCT試験を採用した。

本章では、横引張力によって引き起こされる割裂破壊について、スリット長がどのような影響を与えるかを検証するため、まずはスリット長を変化させた試験体についてCT試験を行う。その後、CT試験において、割裂破壊を発生する時に、一体どのような応力分布になっているか、ということを明らかにするためにFEM解析を行い、応力状態を推定する。そして、その応力状態から割裂破壊メカニズムを想定し、割裂破壊耐力を推定する手法を提案することを目的とする。

2.2. 実験

2.2.1. 試験体および試験方法

試験体には、建材として一般的であるスギ (Japanese cedar, 学名: *Cyptomeria japonica*) の 4m 材から、厚さ 30×長さ 100×幅 120mm の小試験体を切り出し、中間部に幅 2mm 奥行き 30mm・50mm・65mm のスリットを設けたものとした。試験体名称はスリット長が 30mm の試験体を S-30、50mm の試験体を S-50、65mm の試験体を S-65 と名付けた。スリットは歯振幅 2mm の丸鋸で加工をし、そのままの仕上げとした。加力点にはΦ17 の孔を開け、M16 のドリフトピンを通し、加力を行った。試験体は 4m 材一本から切り出し、各 3 体とした。各試験体の形状・仕様について、Fig. 2.1、Table.2.1 に示した。基礎物性値は密度、含水率、年輪幅、年輪傾角について測定した。密度は試験前に試験体重量を測定し、その数値を体積で割った商とし、含水率は試験後の試験体を 105°C の温度下で 24 時間乾燥後重量を測定し全乾法で測定した。年輪幅は各試験体の木口での年輪幅を 5 か所程度測定しその平均値とし、年輪傾角は試験体の割裂によって生じた破面と成長輪がなす角度を 5 か所程度測定しその平均値とした。試験方法は Fig. 2.1 に示すように鋼製治具を介して試験体を 2 本のドリフトピンで支持し、加力速度を 0.5mm/min とし、単調加力にてスリット肩口の開口変位が 5mm に達するまで加力した。加力にはインストロン社製 4204 型万能試験機を用いた。破壊はいずれの試験体も開口変位が 1mm に達する近辺で起こるため、十分に破壊し、かつ破壊後の荷重低下の様子も観察できる条件となっている。またドリフトピンは塑性曲げを生じず、加力による面圧応力が均一に分布していたと考えられる。試験時の荷重は万能試験機のクロスヘッドに内蔵されているロードセルで、開口変位は試験体のスリット肩口に設置したパイ型変位計で計測した。

Table 2.1 Specifications of test specimens.

Specimen	Wood species	Average density (kg/m ³)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Average moisture content (%)	Slit length (mm)	Number of specimens
S-30	Japanese cedar	401.8	7.06	12.9	30mm	3
S-50					50mm	
S-65					65mm	

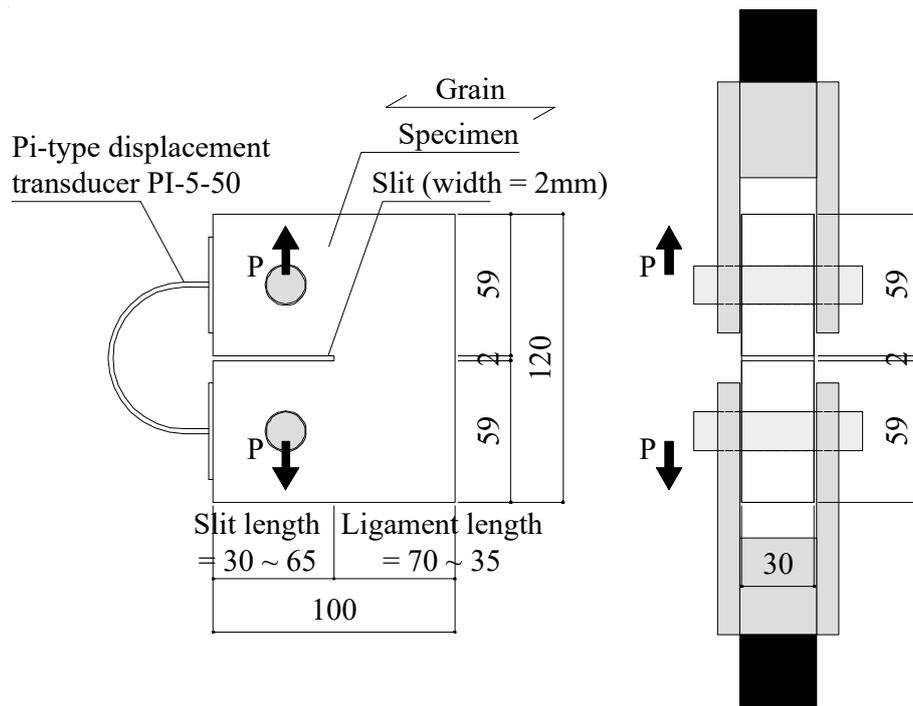


Fig. 2.1 Schematic diagram of the test method.

Note: P: Load, Unit : mm

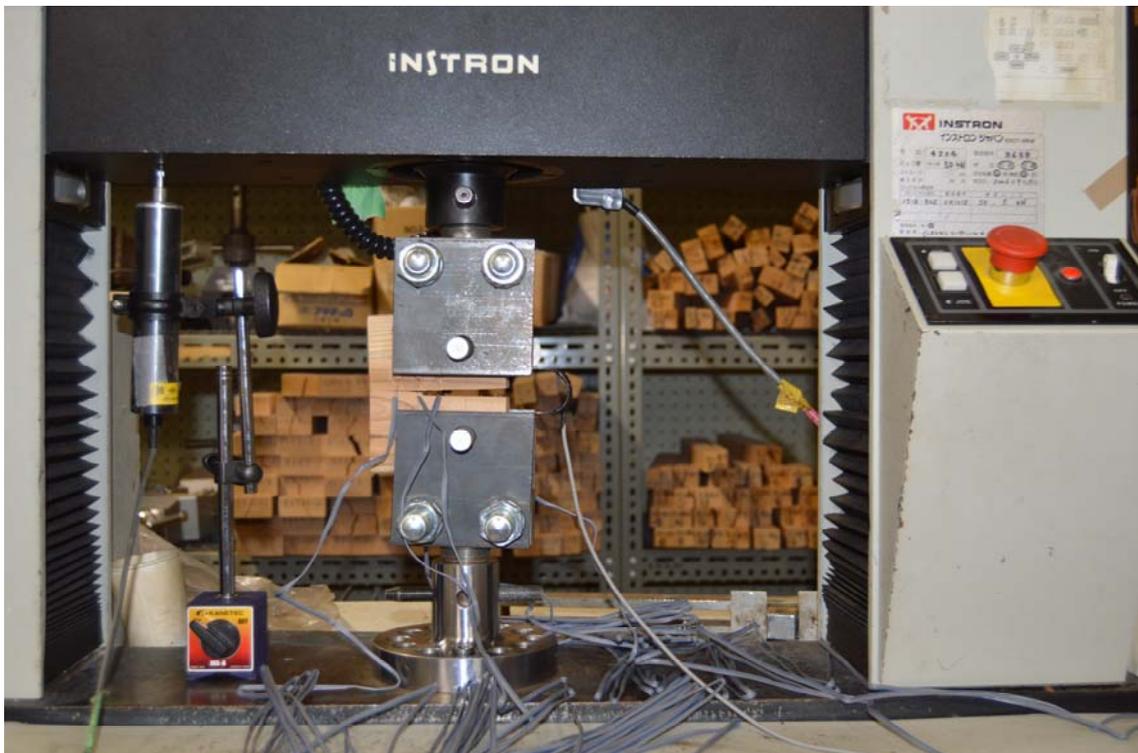


Photo 2.1 Scene of compact tension test.

2.3. 結果と考察

2.3.1. 試験結果および破壊性状

スリット長が 30mm の試験体 S-30 は最大荷重に達した後、一気にスリットが 40~70mm 程度進展し、荷重が低下した。この破壊状況を本報では“脆性破壊 (Brittle fracture)”と名付ける。またスリット長が 50mm と 65mm の試験体 S-50, S-65 は最大荷重に達した後、一気に割裂が 10~20mm 程度進展し、最大荷重以降は緩やかに荷重が低下した。この破壊状況を本報では“延性破壊 (Ductile fracture)”と名付ける。試験体 S-30 は最大荷重が 950N 程度まで達したのに対し、S-50 では最大荷重が約 430N、S-65 では約 290N であった。また、曲げモーメントの影響を受ける割裂破壊では割裂破壊面が徐々に塑性化していくため、若干塑性域を持つ破壊モードとなる。

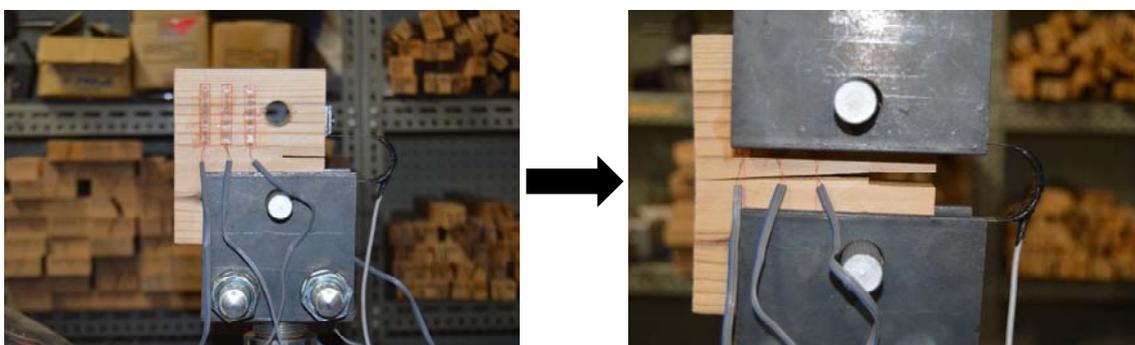


Photo 2.2 State of specimen at splitting (S-30-2).

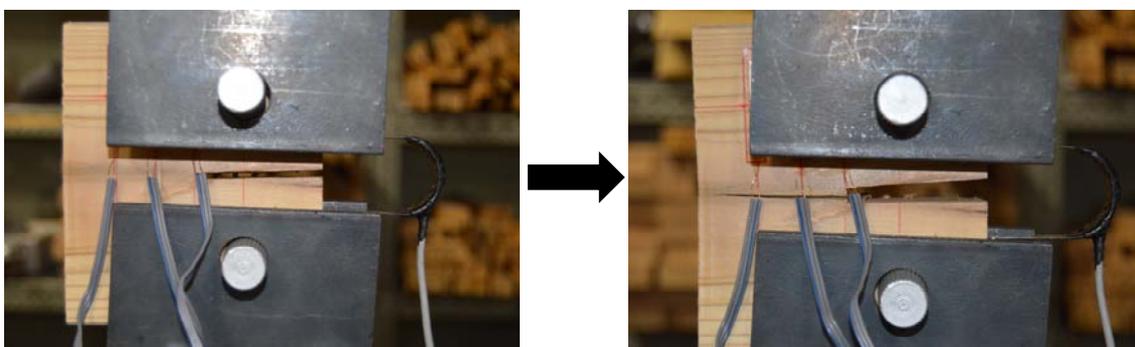


Photo 2.3 State of specimen at splitting (S-50-3).

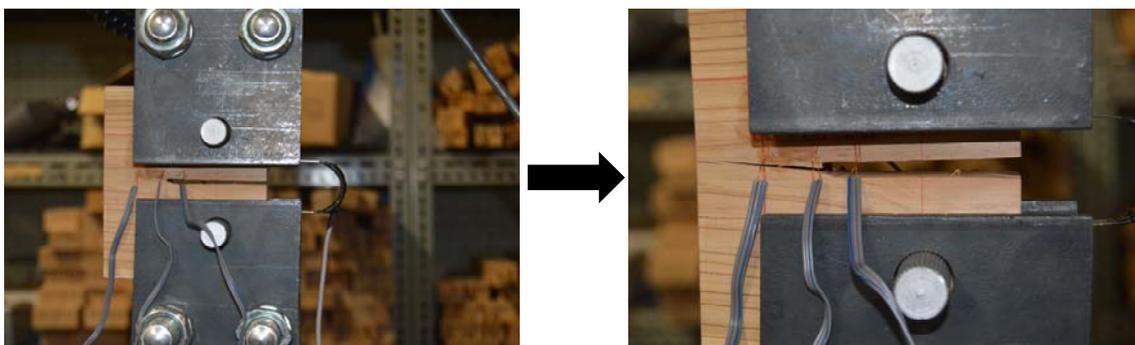


Photo 2.4 State of specimen at splitting (S-65-2).

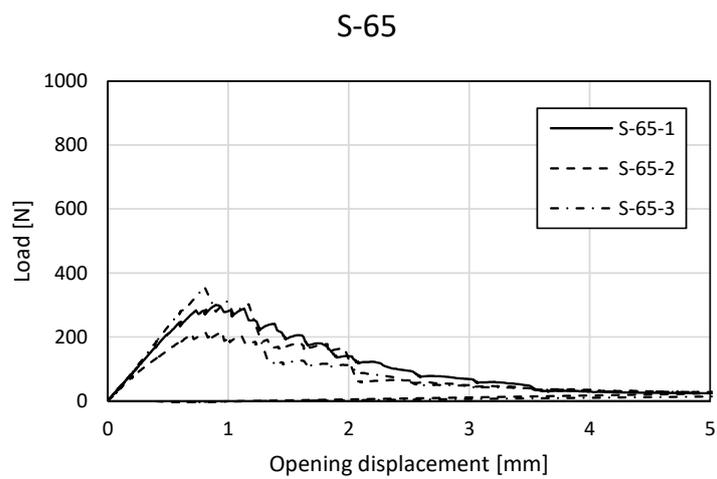
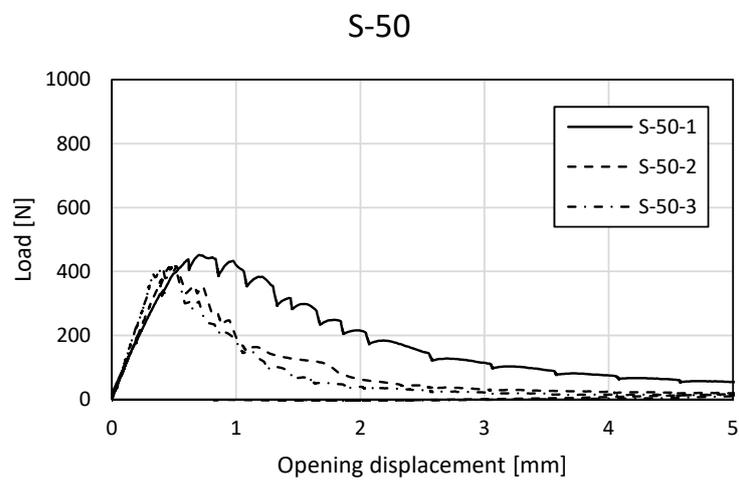
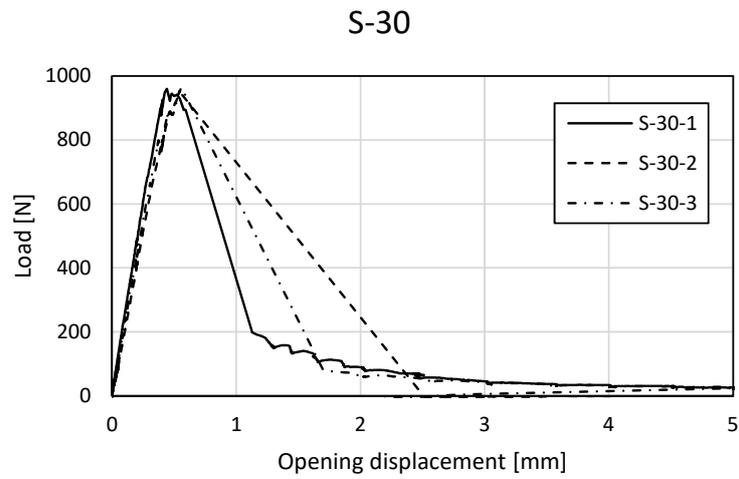


Fig. 2.2 Relationships between load and opening displacement.

Table 2.2 Results of CT tests.

Specimen	P_{max} (N)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Failure mode
S-30-1	959.2	0.44	Brittle fracture
S-30-2	943.7	0.56	Brittle fracture
S-30-3	962.8	0.56	Brittle fracture
Average	955.2	0.52	—

Specimen	P_{max} (N)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Failure mode
S-50-1	452.1	0.70	Ductile fracture
S-50-2	416.7	0.46	Ductile fracture
S-50-3	428.7	0.50	Ductile fracture
Average	432.5	0.56	—

Specimen	P_{max} (N)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Failure mode
S-65-1	300.0	0.90	Ductile fracture
S-65-2	216.6	0.95	Ductile fracture
S-65-3	356.4	0.80	Ductile fracture
Average	291.0	0.88	—

2.4. FEM 解析による検証

本試験の試験体に発生する割裂破壊は、特異点であるスリット底部の応力集中が起因となっていると考えられる。応力の分布傾向を調べるため、試験結果を基に、FEM 解析(有限要素法解析)を行った。FEM 解析は汎用解析プログラム Midas Gen Ver7.1.2((株)マイダスアイティジャパン)を用いて行った。試験体は Fig. 2.3 のように、30mm 厚の平面応力要素でモデル化をし、平面応力解析を行った。モデルの座標軸は試験体の長さ方向に X 軸、高さ方向に Z 軸としている。モデルは試験体形状と同様に中間部に 2mm 幅のスリットを設けた。加力部は実際にはφ17 の円孔であるが、モデル作成の簡便化のため、16mm×16mm の正方形形状とした。有限要素分割は 4mm 毎に行った。モデルに入力する荷重は、片方の加力部に本試験で得られた荷重の平均値(Table 2.2 の Average P_{max})を入力し、もう一方には反力が取れるように支点を配置した。試験体の弾性係数・せん断弾性係数・ポアソン比は木材工業ハンドブック¹⁰⁾を参考に Table 2.3 の値を入力した。

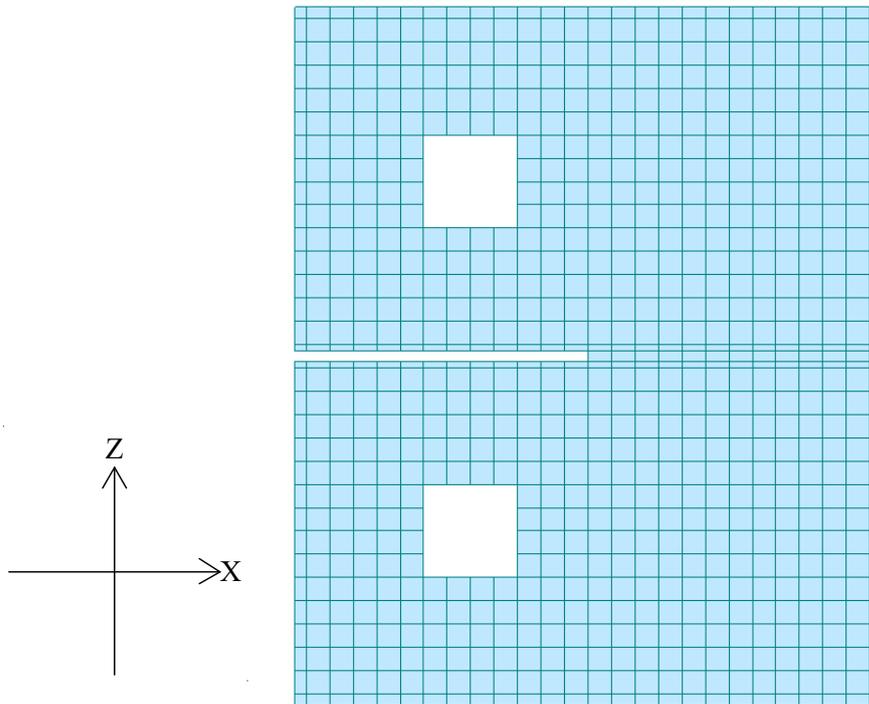


Fig. 2.3 FEM model of CT test.

Table 2.3 Specification of FEM model.

Modulus of elasticity			Shear modulus of elasticity			Poisson's ratio		
E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}	μ_{xy}	μ_{xz}	μ_{yz}
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)			
7350	290	590	340	640	15	0.6	0.4	0.65

2.5. FEM 解析結果と考察

解析結果で得られた各試験体の高さ方向の引張力(本解析では、Z 軸方向の直応力度となり、 σ_{zz} で表される)の応力状態を Fig. 2.4~2.6 に示す。CT 試験は試験体のスリット底部の引張応力の集中によって、割裂破壊が引き起こされる。一方で、スリットの逆側となる試験体端部では圧縮応力に転じている様子が観察できる。すなわち CT 試験体でのスリット底部での応力集中は圧縮側縁を支点としたテコで生じていると考えられる。本解析結果による割裂破壊発生時のスリット底部の引張応力度はいずれの試験体においても約 3.61N/mm^2 で一定値となった。一般にスリットのように明確な特異点を持つ構造で FEM 解析を行うと、部材の分割数が増えるほど応力度が上昇する傾向がある。そのため、今回の解析で得られた数値が、割裂破壊を引き起こす応力度であるということではなく、あくまでも傾向を確認するため(解析条件が同様であれば、最大引張応力度が一定になるということ)に行った解析であることを断っておく。

そのことを考え、スリット底部から圧縮側縁の線上の引張応力度の分布(Fig. 2.7 の Sec での引張応力度の分布)に注目すると Fig. 2.7 のようになる。この結果を見ると、いずれの試験体もスリット底部から圧縮側端部までの区間 (以下、リガメントと呼ぶ) で、反曲点が存在するが、その位置が試験体の形状によって異なることがわかる。つまり、S-65 のようにリガメントが短い試験体では、反曲点がリガメントのほぼ中心位置になり、それ以上長くなると徐々に圧縮側材端に近づく傾向が見られた。

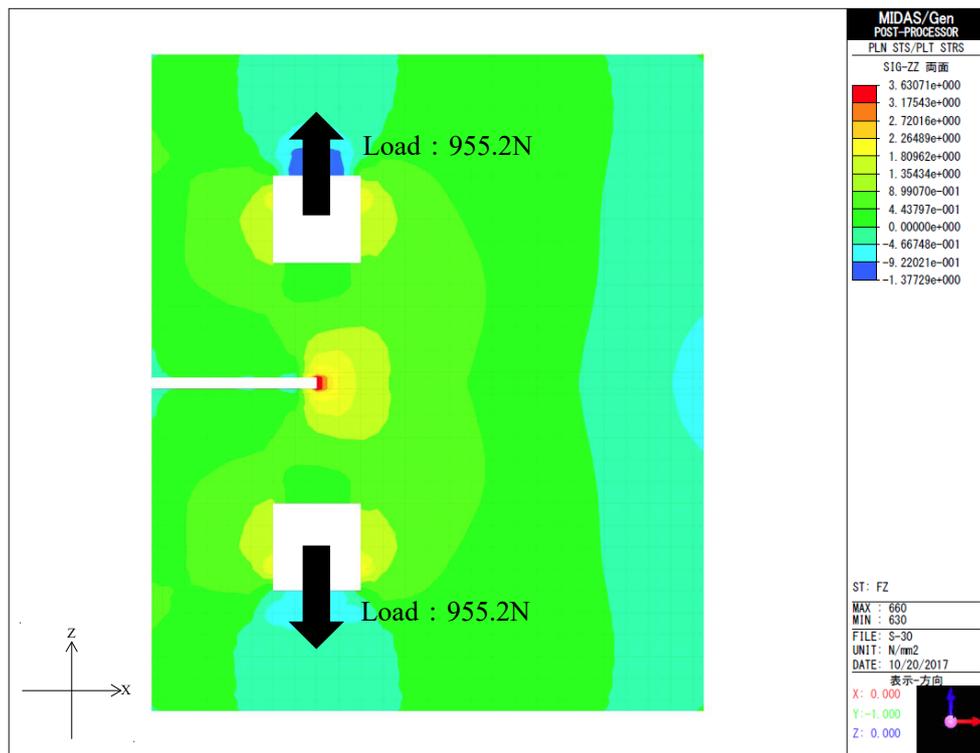


Fig. 2.4 Stress distribution of CT specimen at splitting (S-30).

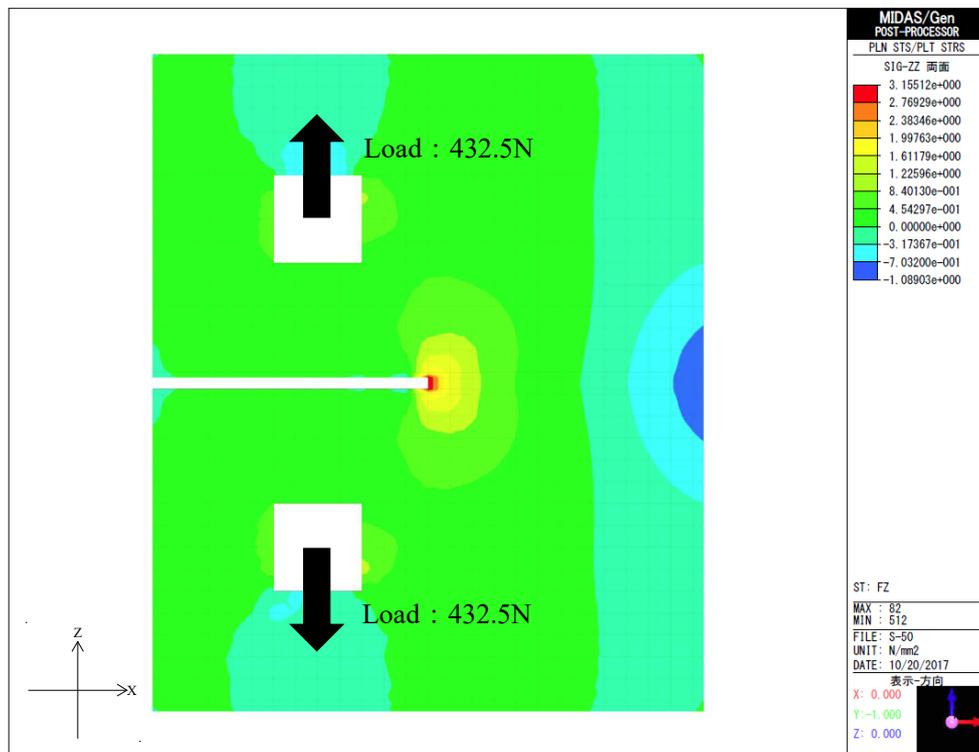


Fig. 2.5 Stress distribution of CT specimen at splitting (S-50).

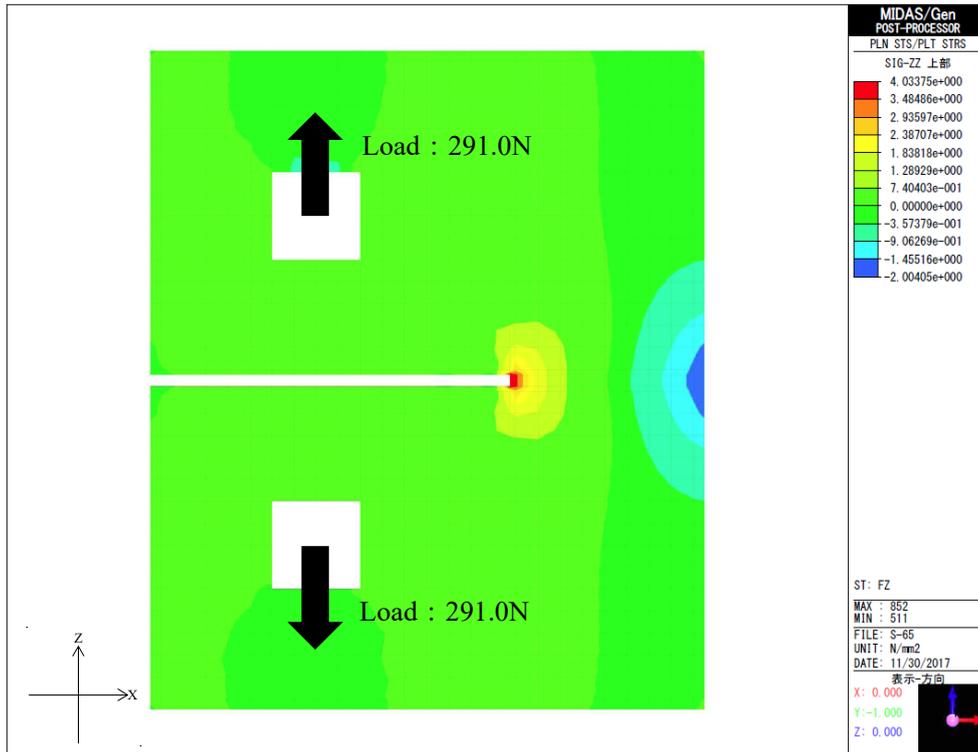


Fig. 2.6 Stress distribution of CT specimen at splitting (S-65).

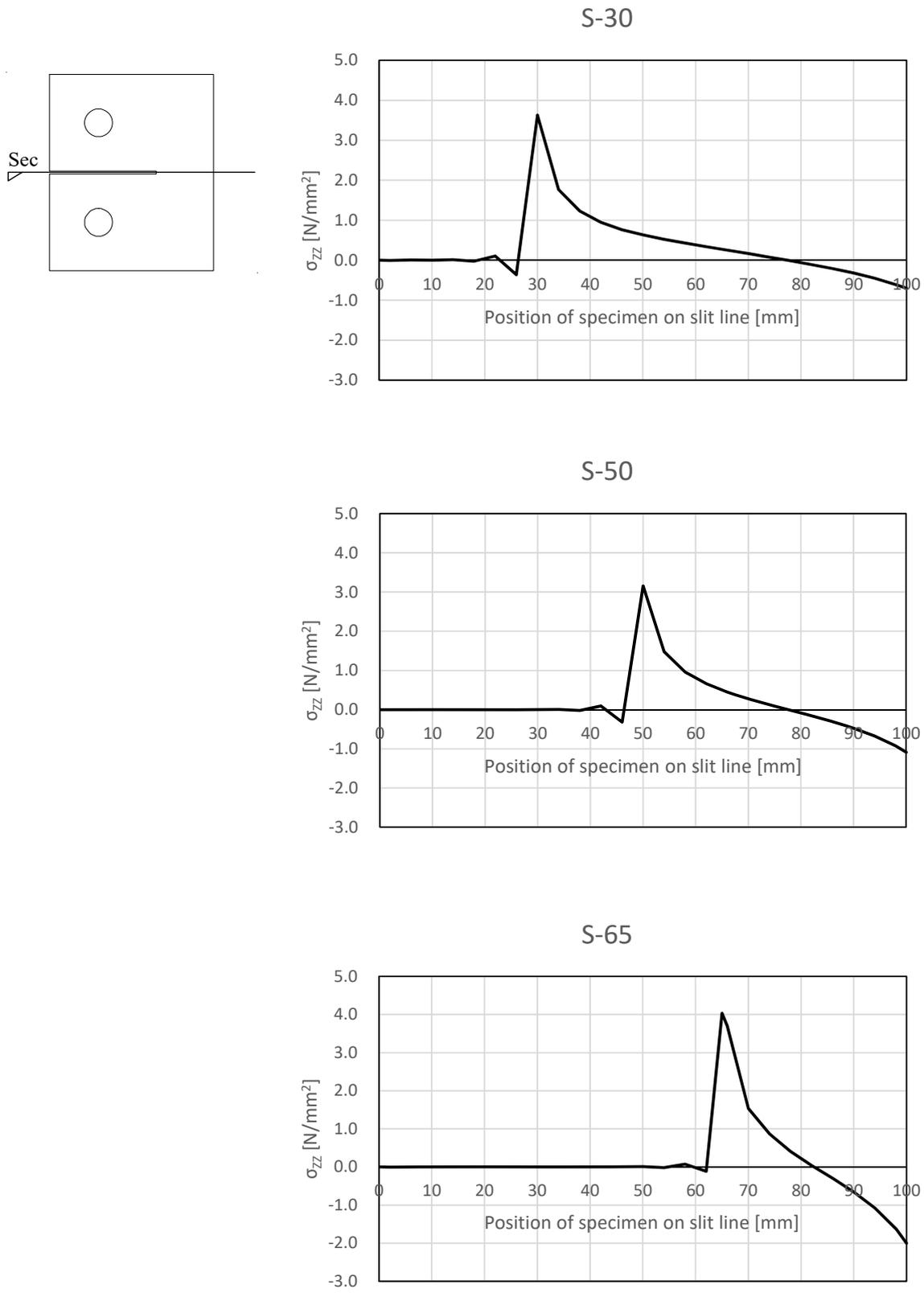


Fig. 2.7 Stress distribution on ligament of CT specimen at splitting.

2.6. FEM 解析によるケーススタディ

2.6.1. 解析方法

今回のモデルにおける解析ケースではスリット底部が約 3.6N/mm^2 に達した時に、割裂破壊を起こす。本ケース同条件で解析を行った場合、スリット底部の引張応力が約 3.6N/mm^2 になるように解析を行えば、逆算的に割裂破壊時の荷重を推定することができると考えられる。そこで、スリット・リガメント比 (=Fig. 2.8 における a/W) を $0.02\sim 0.83$ に変化させた場合のケーススタディを行い、様々な条件下における CT 試験での試験体の応力状態の検証を行った。

解析方法は 2.4 節の方法に従い、Midas Gen を用いて行った。モデル化は 30mm 厚の平面応力要素とし、モデルの座標軸、中間部のスリット幅、加力部の形状、試験体の物性諸元は 2.4 節に従った。試験体寸法は Fig. 2.8 のように名付け、本試験での試験体 S-50 を基準とし、 $a=20\text{mm}$ を固定して、 W の長さを調整した。それにより、Table 2.4 のように、 a/W の異なる 8 つの試験ケースについて解析を行った。

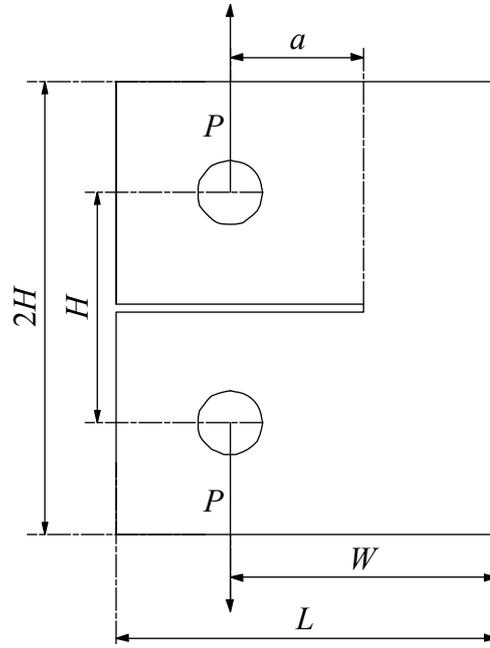


Fig. 2.8 Characteristic definition of shapes of specimen.

Table 2.4 Cases of Analysis of CT tests.

Case	Shape of specimen			
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W
Case1			70	0.29
Case2			24	0.83
Case3			28	0.71
Case4	30	20	33.3	0.60
Case5			36	0.56
Case6			40	0.50
Case7			170	0.12
Case8			1070	0.02

Note: a , W , a/W : Dimension of specimen. See Fig. 2.8.

2.6.2. 解析結果

全てのケースについてまとめた解析結果を Table 2.5 に、ケース毎の試験結果を Fig. 2.9～2.16 に示す。まず、Case1 と本試験の S-50 の試験体は同一のモデルであるが、割裂破壊する際の応力(実験値：432.5N に対し、解析値：466.1N)と変形量(実験値：0.56mm に対し、解析値：0.55mm)がほぼ同値であり、本解析は弾性範囲内では実際の実験と大差ない結果が得られている。そのため、本解析で妥当なモデル化ができていると判断した上で以下の考察をしている。

既報^{8),9)}より、 a/W が割裂耐力や破壊靱性に影響を及ぼす事を実験で検証しているが、余長がほとんどない場合や十分に取れている場合など極端なケースについては分かっていないことが多い。Fig. 2.17 のように、余長が長く、 a/W が低い試験体では、割裂破壊耐力が大きく、余長が短く、 a/W が大きい試験体では割裂耐力は低い。 a/W が 0.29 であった Case1 以上の試験体では、本試験体と同様に、スリット底部で引張応力が生じ、スリットと逆側の試験体縁で圧縮応力が生じていた。その反曲点はいずれもリガメント長の約半分の位置であった。一方で、 a/W が Case1 よりも小さい試験体では、スリットと逆側の試験体縁にほとんど圧縮応力が発生しなかった。

解析結果を基に、破壊靱性を算出した。ここで一旦、破壊力学で用いられる用語を整理しておく。破壊靱性とは、き裂状欠陥を有する部材の破壊強度であり、応力拡大係数や J 積分などの破壊力学パラメータで評価される。すなわち、応力拡大係数や J 積分という数値が大きいと、破壊靱性が大きく、破壊を起こしづらい部材である、と評価される。

既報^{8),9)}より、J 積分値の算出方法は以下のように提案されている。これは、Merkle らの提案式¹⁰⁾に修正を施した Clarke らの簡便式¹¹⁾を元としており、JSME⁴⁾にも採用されている。

$$J_{1c} = \frac{A}{B \times b} \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.1)$$

ここで、

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(2 \cdot \frac{1 + \beta}{1 + \beta^2}\right)$$

$$\beta = \left(\left(\frac{2a}{b}\right)^2 + 2 \left(\frac{2a}{b}\right) + 2 \right)^{1/2} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right)$$

a : 予き裂長さ(mm)、 W : 試験片幅(mm)、 b : リガメント幅(= $W - a$) (mm)、 B : 試験体厚さ(mm)、 A : 荷重変位曲線の面積(ここでは最大荷重までのもの)(mm²)

(2.1)式で用いられている試験体寸法は、Fig. 2.8 と対応している。

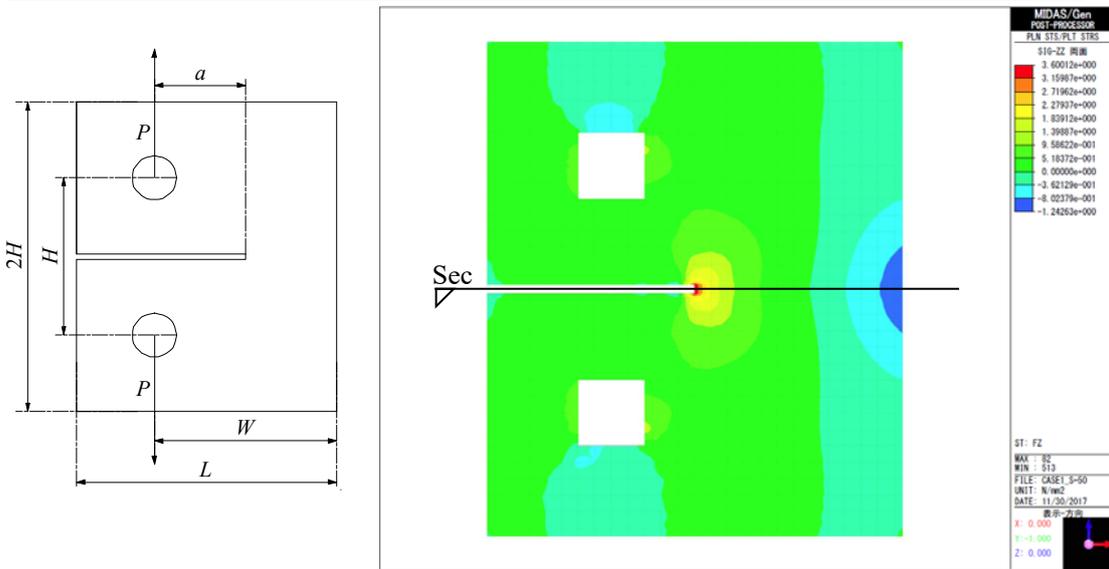
J積分と a/W の関係を Fig. 2.18 に示す。J積分は a/W が大きくなるほど、J積分値が大きくなる。本試験の S-50($a/W=0.29$)・S-65($a/W=0.50$)の試験結果と解析結果はほぼ一致した。この結果より、FEM 解析は実際の CT 試験を適切にモデル化できていたと考えられる。一方で S-30($a/W=0.00$)は解析結果と全く異なる結果となった。これは同じ $a/W=0.00$ であっても、 $a=0$ または $W=\infty$ の結果として $a/W=0.00$ となったという違いがあったためだと考えられる。

Table 2.5 Results of analysis of CT tests.

Case	Shape of specimen				Result		
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W	Load (N)	Opening displacement (mm)	J_{IC} (N/mm)
Case1			70	0.29	493.5	0.584	0.227
Case2			24	0.83	22.5	2.173	0.425
Case3			28	0.71	63.6	1.373	0.391
Case4	30	20	33.3	0.60	121.0	1.012	0.339
Case5			36	0.56	151.5	0.917	0.324
Case6			40	0.50	195.9	0.822	0.304
Case7			170	0.12	1061.4	0.495	0.140
Case8			1070	0.02	1190.7	0.494	0.023

Note: a , W , a/W : Dimension of specimen. See Fig. 2.8.

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width	a	W	a/W	Load	Opening displacement	J_{IC}
	(mm)	(mm)	(mm)		(N)	(mm)	(N/mm)
Case1	30	20	70	0.29	493.5	0.584	0.227



Case 1 Stress distribution on the section

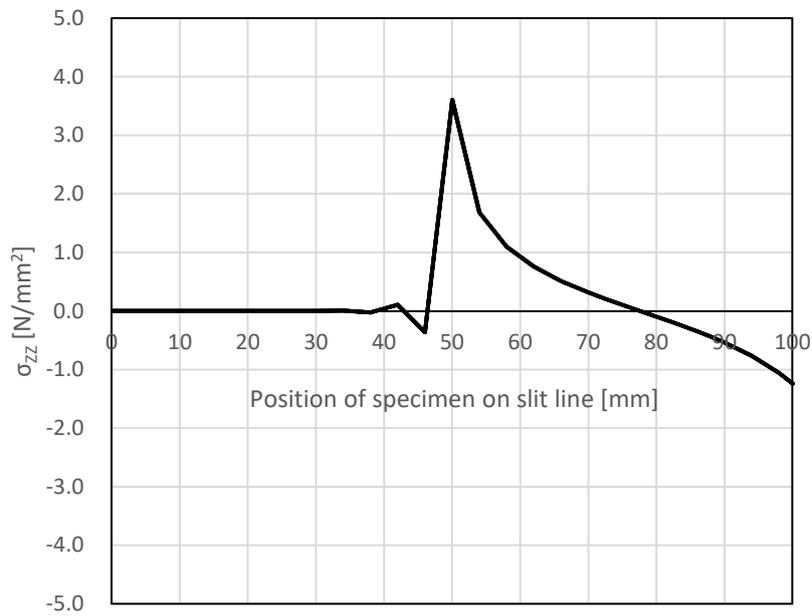
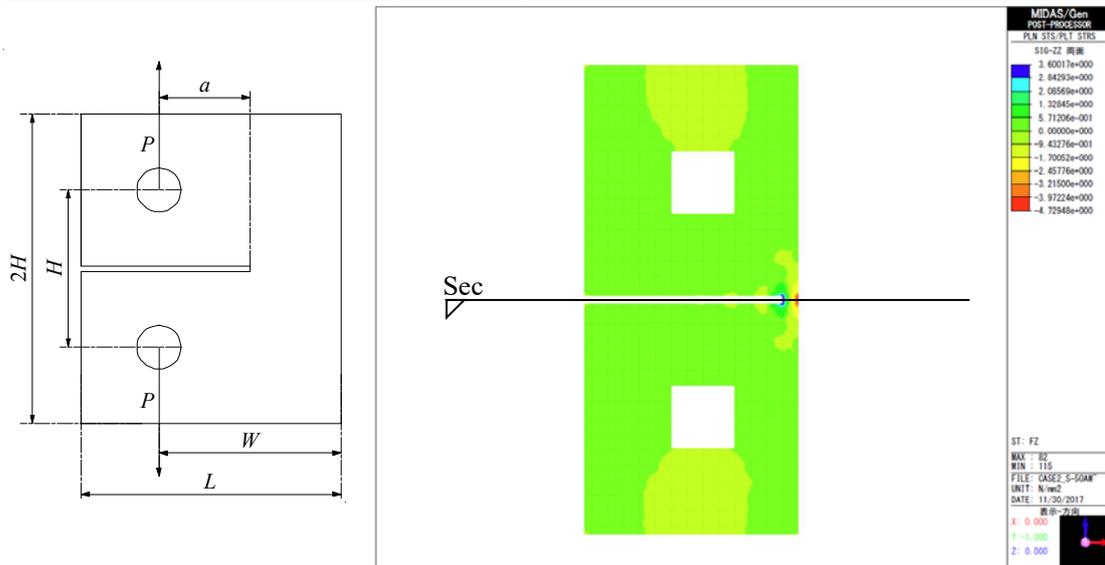


Fig. 2.9 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 1).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W	Load (N)	Opening displacement (mm)	J_{IC} (N/mm)
Case2	30	20	24	0.83	22.5	2.173	0.425



Case 2 Stress distribution on the section

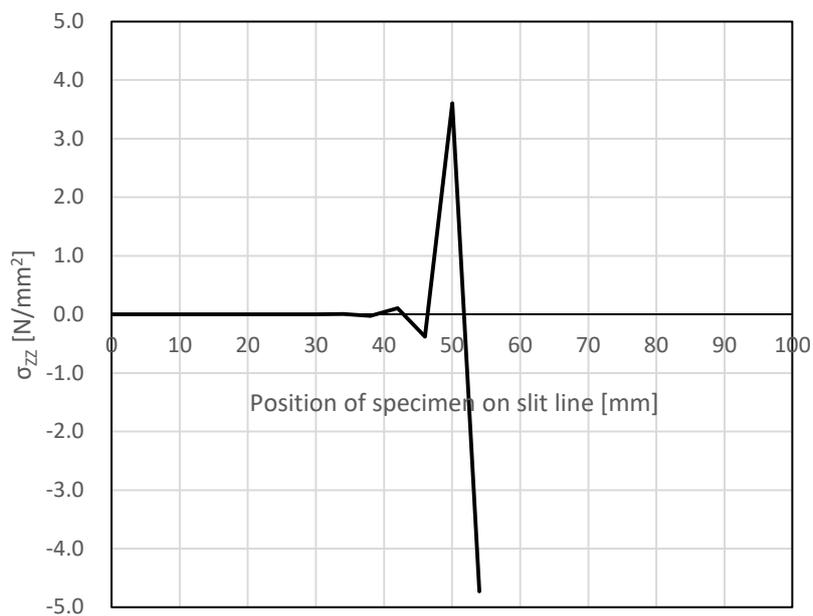
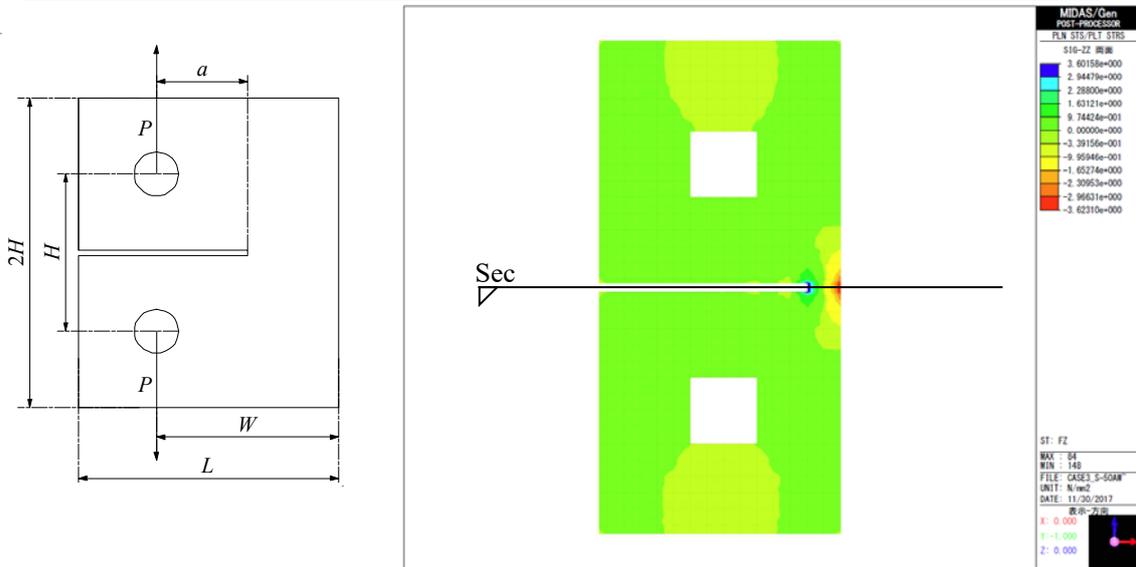


Fig. 2.10 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 2).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W	Load (N)	Opening displacement (mm)	J_{IC} (N/mm)
Case3	30	20	28	0.71	63.6	1.373	0.391



Case 3 Stress distribution on the section

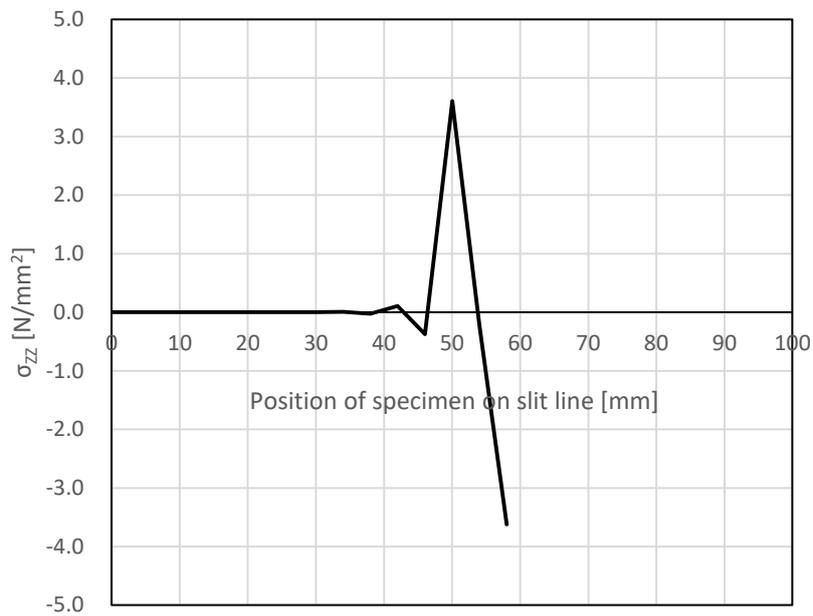
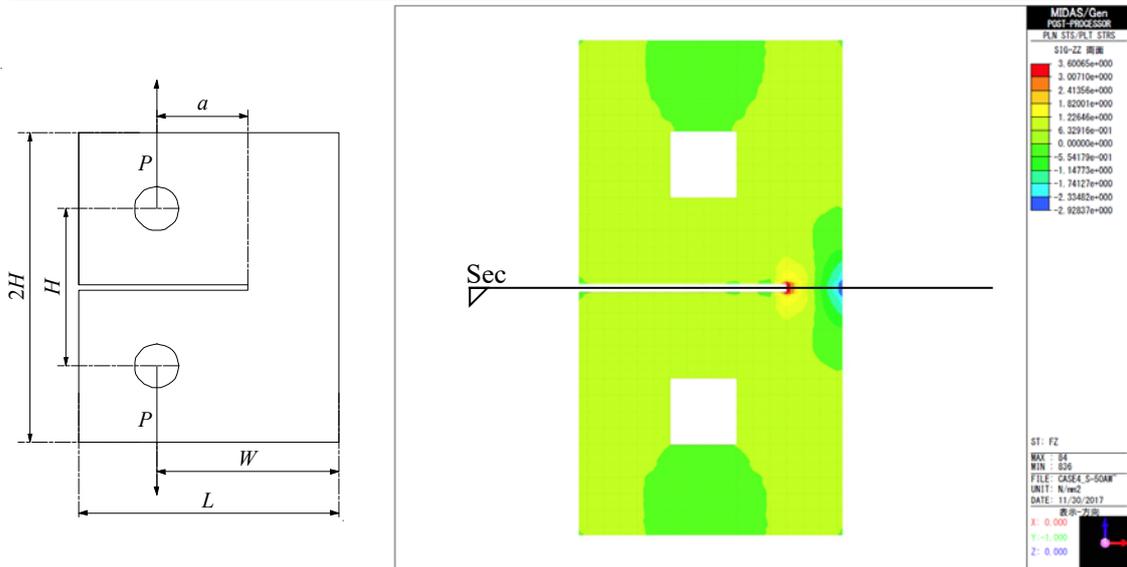


Fig. 2.11 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 3).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W	Load (N)	Opening displacement (mm)	J_{IC} (N/mm)
Case4	30	20	33.3	0.60	121.0	1.012	0.339



Case 4 Stress distribution on the section

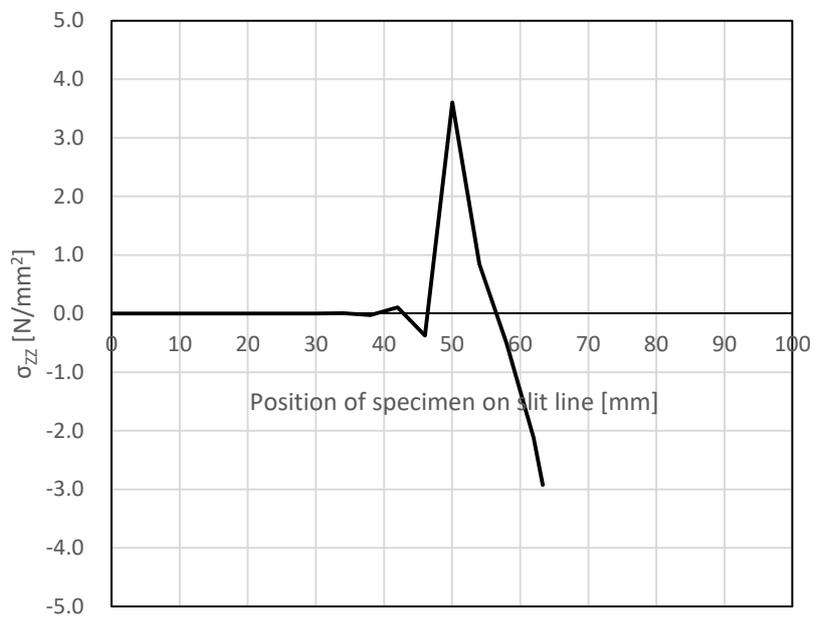
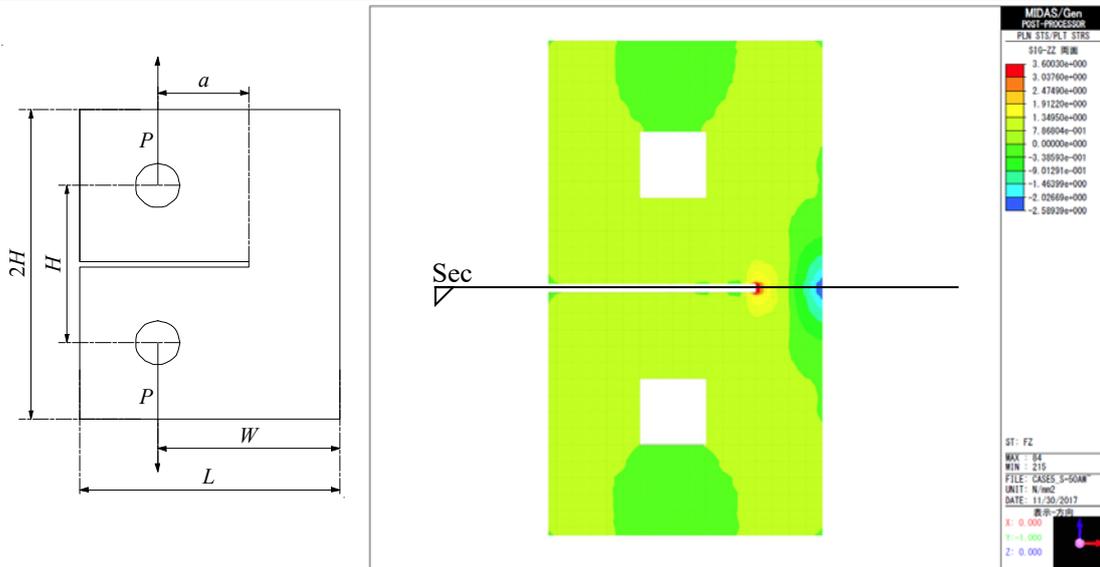


Fig. 2.12 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 4).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width (mm)	a (mm)	W (mm)	a/W	Load (N)	Opening displacement (mm)	J_{IC} (N/mm)
Case5	30	20	36	0.56	151.5	0.917	0.324



Case 5 Stress distribution on the section

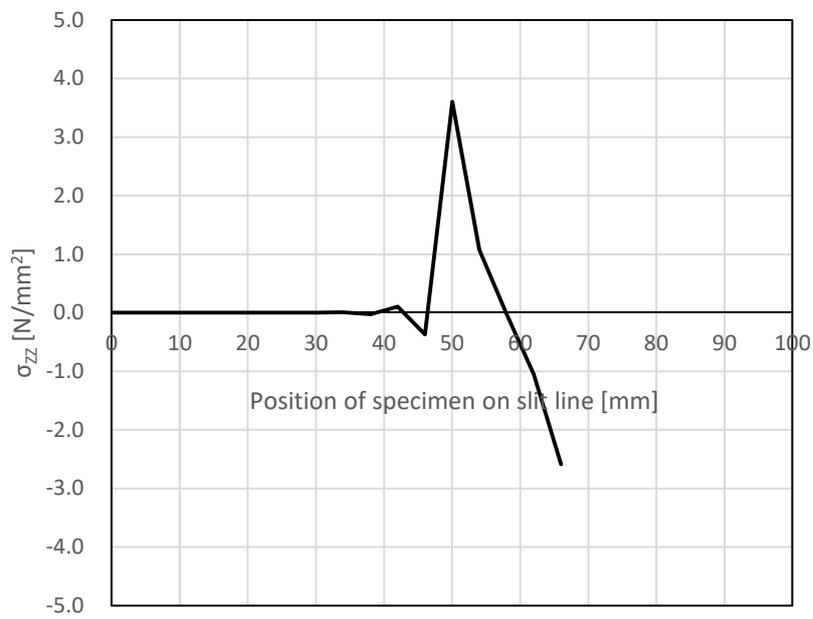
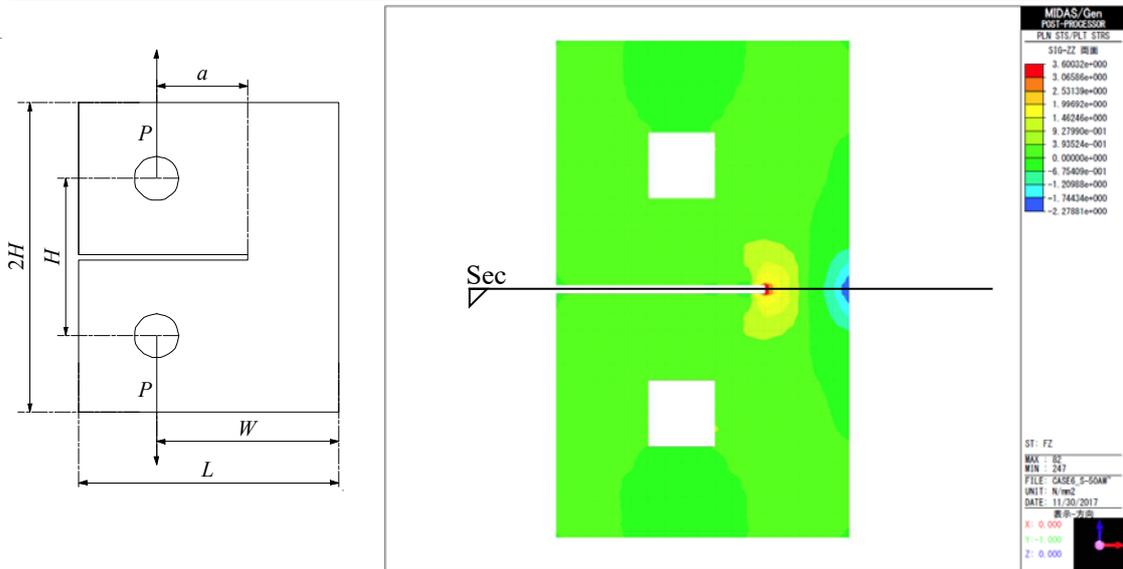


Fig. 2.13 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 5).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width	a	W	a/W	Load	Opening displacement	J_{IC}
	(mm)	(mm)	(mm)		(N)	(mm)	(N/mm)
Case6	30	20	40	0.50	195.9	0.822	0.304



Case 6 Stress distribution on the section

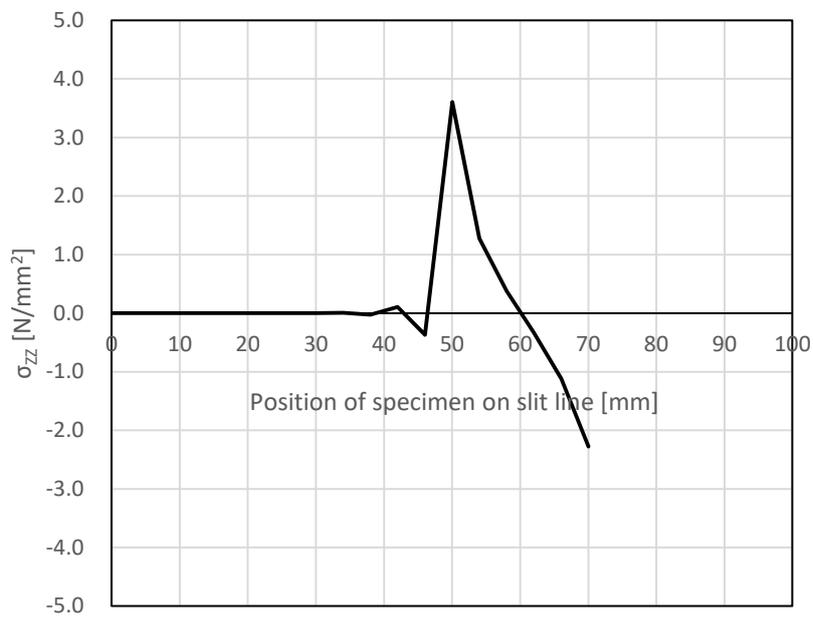
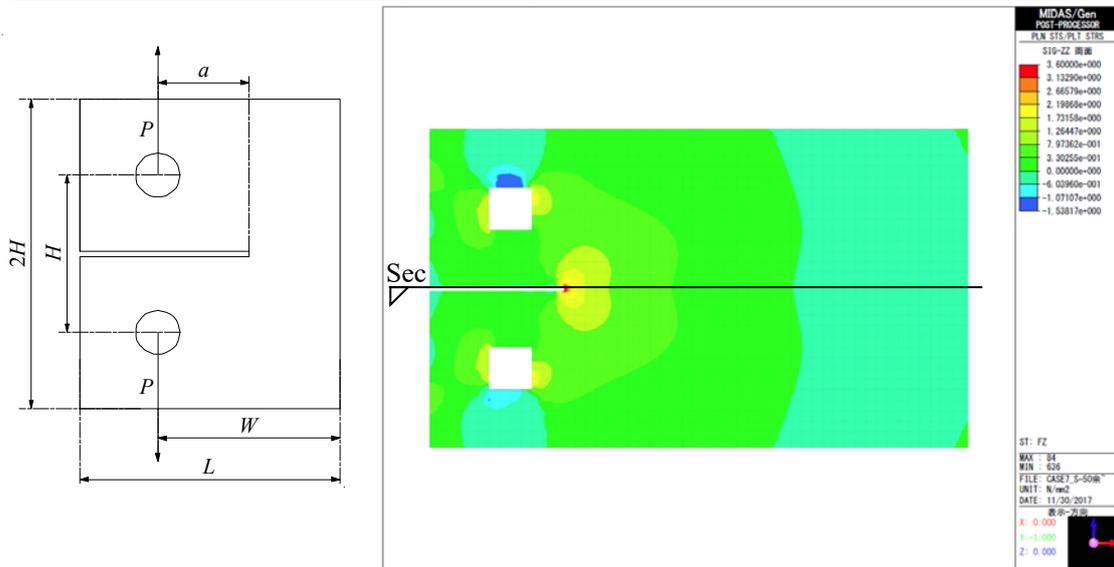


Fig. 2.14 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 6).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width	a	W	a/W	Load	Opening displacement	J_{IC}
	(mm)	(mm)	(mm)		(N)	(mm)	(N/mm)
Case7	30	20	170	0.12	1061.4	0.495	0.140



Case 7 Stress distribution on the section

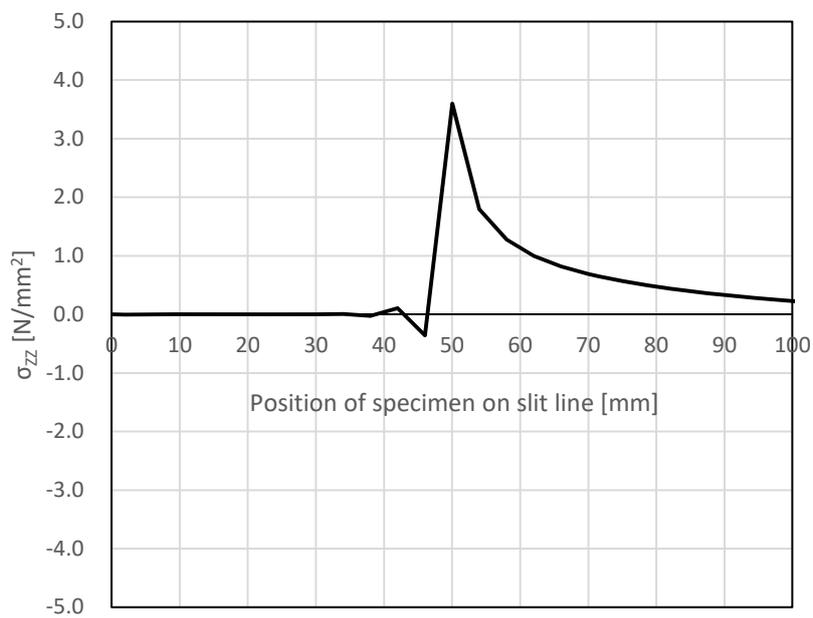
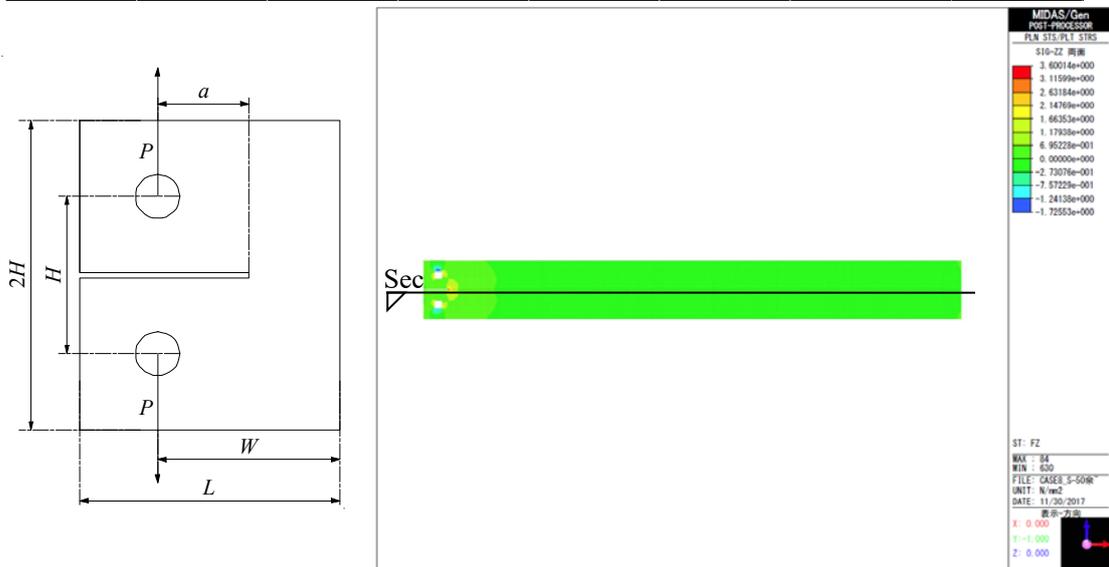


Fig. 2.15 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 7).

Case	Shapes of specimen				Result		
	Width	a	W	a/W	Load	Opening displacement	J_{IC}
	(mm)	(mm)	(mm)		(N)	(mm)	(N/mm)
Case8	30	20	1070	0.02	1190.7	0.494	0.023



Case 8 Stress distribution on the section

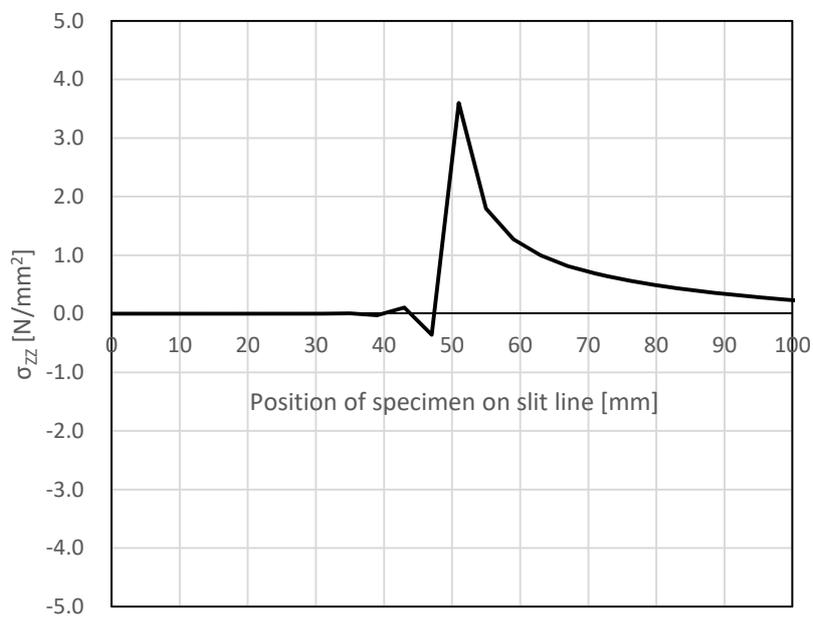


Fig. 2.16 Stress distribution of FEM model at splitting (Case 8).

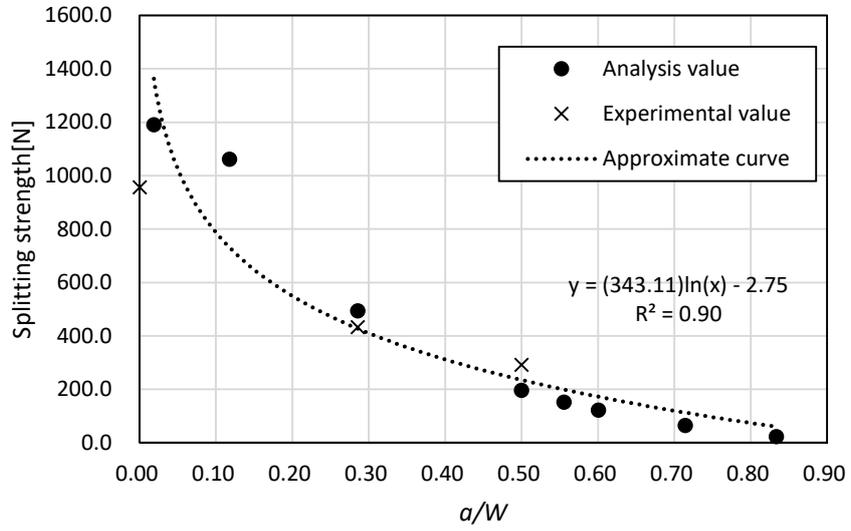


Fig. 2.17 Relationships between splitting strength and a/W .

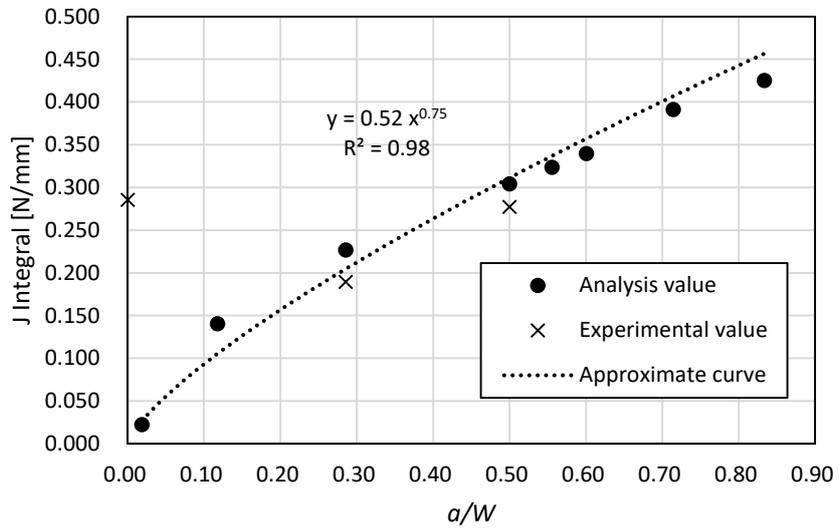


Fig. 2.18 Relationships between J integral and a/W .

2.7. CT 試験体の割裂耐力推定式の提案

2.7.1. 耐力推定式の考え方

CT 試験は、J 積分値などの破壊力学パラメータを計測するため、発展し規格化されてきた試験方法であるが、一方で横引張力のみで割裂破壊を発生させる試験である。前項までに行ってきた FEM 解析による応力状態を基に CT 試験の変形を想定し、エネルギー量の釣り合いから、割裂耐力の推定を行えるのではないかと考えた。

割裂破壊は最大荷重に達するまでの塑性領域が微小であること、また最大荷重以降での塑性変形の評価が難しいことから弾性的な挙動を示すものと本論文では考えることとする。この時、線形破壊力学に則り割裂破壊荷重を求めようとする場合、開口変位が δ_a 進行した時の外力のエネルギーの損失量とエネルギー開放率と割裂進行面積の積が同値になることより、以下のような関係式が導かれる¹³⁾。

$$\Delta W = P(2\delta - 2\delta_a) = G_c \cdot b \cdot \Delta l \quad (2.2)$$

ここで、 ΔW : 割裂破壊により損失するエネルギー量(N・mm)、 P : 荷重(N)、 δ : 開口肩口での変形量(mm)、 δ_a : 開口肩口での変形の進行量(mm)、 G_c : エネルギー開放率(N/mm)、 Δl : 割裂進展長(mm)

式(2.2)を、割裂進展長について積分すると、最大荷重に達した時点では式(2.3)のようになる。

$$W = \frac{1}{2} \cdot P \cdot 2\delta = P\delta = G_c \cdot b \cdot l \quad (2.3)$$

ここでエネルギー量 $W=P\delta$ としたのは Fig. 2.19 で示すモデルと整合させるためである。割裂の進展長は瞬間的に進むため、定量的に評価することが難しく、複雑な数式として導かれることが多い。そこで簡便な式となるようにモデル化を行い耐力推定式の誘導を行うこととした。

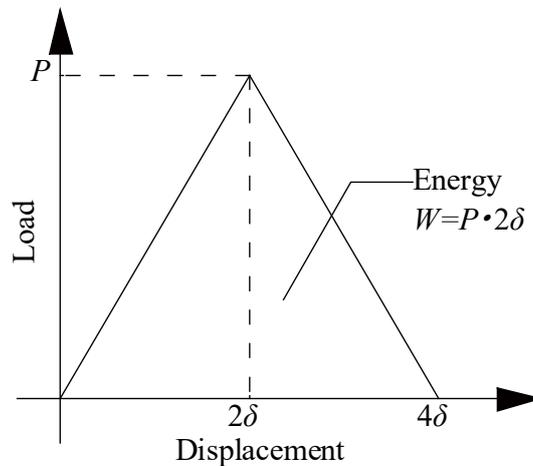


Fig. 2.19 Conceptual diagram of relationship between load and displacement at splitting failure.

Note: P : Load, δ : Displacement, W : Energy.

CT 試験では荷重は最大値を迎えるまではほぼ弾性で荷重が上昇し、線対称に近い形で荷重が低下する。本試験でも、割裂の変位が $2\delta_{Pmax}$ に達した時点での総エネルギー量は弾性範囲 (δ_{Pmax}) までのもののおよそ 2 倍であった。その後、荷重は CT 試験体の余長部分(以下、リガメント)が分離するまで、低い値で一定値を取る。これは割裂破壊が進行しほとんど剛性を失っているが、リガメントが完全に分離しきっていないためだと考えられる。この状態に達した時点で試験体はエネルギー量をほとんど損失しているため、そこで、Fig. 2.19 のような荷重変形関係を考え、荷重が 0 になった時にリガメントが完全に分離すると考えると、式(2.3)を以下のように表すことができる。

$$W = 2P\delta = G_c \cdot b \cdot l_1 \quad (2.4)$$

ここで、 l_1 : Fig. 2.20 に示す寸法(mm)

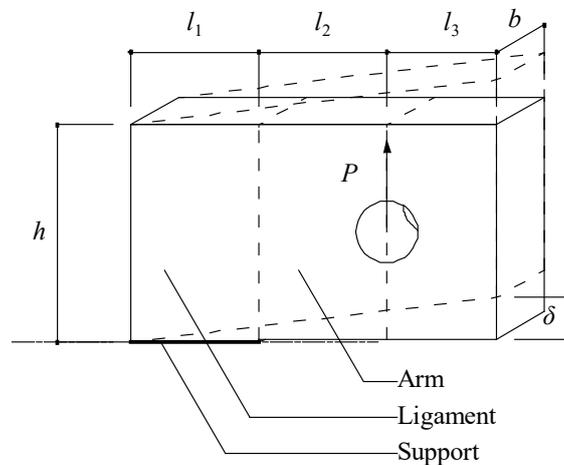


Fig. 2.20 Mechanical model of the CT test specimen.

Note: P : Load, δ : Opening displacement.

このように考えた場合、耐力推定式の障壁である割裂の進展長がリガメント長さとして表されるので、耐力推定式の簡便化につながる。以上より、式(2.4)を基に CT 試験における割裂耐力推定式の誘導を行う。

2.7.2. CT 試験体の割裂耐力推定式

2.7.2.1. 開口肩口の変形量

(a) 開口肩口のアームの曲げ変形量

支点を固定端とし、アームを片持ち梁と考えると、アームの曲げ変形量 δ_1 は、

$$\delta_1 = \frac{P \cdot l_2^3}{3EI_A} \quad (2.5)$$

ここで、 P : 割裂破壊荷重(N)、 E : 繊維方向ヤング率(N/mm²)、 I_A : アーム部の断面二次モーメント(mm⁴)、 l_2 : Fig. 2.20 に示す寸法(mm)

(b) 開口肩口のアームのせん断変形量

支点を固定端とし、アームを片持ち梁と考えた時のアームのせん断変形量 δ_2 は、

$$\delta_2 = \frac{P \cdot l_2}{GA_A} \quad (2.6)$$

ここで、 G : せん断弾性係数(N/mm²)、 A_A : アーム部の断面積(mm²)

(c) リガメント部の引張変形量

リガメント部の加力方向への引張変形を考えると、引張変形量 δ_3 は、

$$\delta_3 = \frac{\sigma_t \cdot h}{E_T} = \frac{P \cdot h}{E_T(b \cdot l_1)} \quad (2.7)$$

ここで、 σ_t : 引張応力度(N/mm²)、 E_T : 接線方向ヤング率(N/mm²)、 l_1, b, h : Fig. 2.20 に示す寸法(mm)

リガメントは柁目面または板目面となることから安全側に考え、T方向(接線方向)でのヤング率とする。T方向のヤング率は概ねL方向(繊維方向)の1/20になることから、

$$E_T = \frac{1}{20}E \quad (2.8)$$

(d) リガメント部の支点での回転変形による肩口開口部の変形量

リガメント部の支点の回転変形による肩口開口部の変形量 δ_4 は、Fig. 2.21 のように考えると、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \delta_4 &= \theta \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3 \right) \\ &= \frac{M_S}{E_T \cdot I_L} \cdot \frac{l_1}{2} \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3 \right) \\ &= \frac{P \cdot l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1 \right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3 \right)}{2E_T \cdot I_L} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで、 θ : スリット部での回転変形量(rad)、 M_S : 支点でのモーメント(N・mm)、 I_L : リガメント部の断面二次モーメント(mm⁴)

リガメント部の支点での回転変形は CT 試験体のような余長の短い試験体では本報のモデルのように回転中心をリガメントの中心位置としたが、余長が十分に取れている構造物では、2.6 節で説明したように反曲点が、材端側に近づく。その場合は適宜反曲点の設定が必要になる。

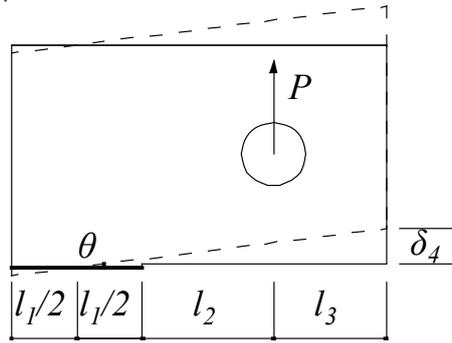


Fig. 2.21 Mechanical model of rotational deformation of the ligament.

Note: P :Load, θ :Rotation angle at ligament, δ_4 :Part of opening displacement by rotation at ligament.

(e) 開口肩口での総変形量

アーム両側の変形を考え、開口肩口での総変形量 2δ は、

$$2\delta = 2(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) = 2P \left\{ \begin{array}{l} \frac{l_2^3}{3EI_A} + \frac{l_2}{GA_A} + \frac{h}{E_T(b \cdot l_1)} \\ l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right) \\ + \frac{\phantom{l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right)}}{2E_T \cdot I_L} \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

2.7.2.2. 開口肩口での仕事量と破壊エネルギーの釣り合い

式(2.4)～式(2.10)より、

$$G_c \cdot b \cdot l_1 = 2P^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{l_2^3}{3EI_A} + \frac{l_2}{GA_A} + \frac{h}{E_T(b \cdot l_1)} \\ l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right) \\ + \frac{\phantom{l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right)}}{2E_T \cdot I_L} \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

式(2.11)を、 P について整理すると、

$$P = C_\gamma \sqrt{\frac{3b \cdot l_2}{10G \left\{ \begin{array}{l} \frac{l_2^3}{3EI_A} + \frac{l_2}{GA_A} + \frac{h}{E_T(b \cdot l_1)} \\ l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right) \\ + \frac{\phantom{l_1 \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3\right)}}{2E_T \cdot I_L} \end{array} \right\}}} \quad (2.12)$$

ここで、 C_γ : 割裂破壊定数[N/mm^{1.5}]

割裂破壊定数は 3.4.1 項で詳しく説明するが、安村らによって提案された割裂破壊を定めるパラメータの一つであり¹⁴⁾、以下の式で表される。

$$C_\gamma = \sqrt{\frac{G \cdot G_c}{0.6}} \quad (2.13)$$

2.8. まとめ

本章では、スリット長を変化させた試験体での CT 試験を実施し、それらの試験体の応力状態を FEM 解析で推定した。その後、余長を変化させた試験体を想定したケーススタディを解析的に行った。それにより、CT 試験体ではスリットと反対側の材端で圧縮応力が生じ、テコの作用で、スリット底部に応力集中が生じていることがわかった。比較的余長が短い試験体(本報では、 $a/W \geq 0.29$)ではその反曲点がおおよそリガメントの中間位置となることも明らかになった。一方で余長が長い試験体($a/W < 0.29$)では反曲点が材端側に近くなっていた。

試験及び解析結果から、CT 試験体に横引張力が加わった時の応力状態と変形性状を考慮し、エネルギー量の釣り合いから、CT 試験体における耐力推定式を提案した。次章で実験結果と推定値の比較を行い、提案した割裂メカニズム及び推定式の妥当性を検証する。

3. 樹種の違いを考慮した割裂破壊パラメータの算出とメカニズムの検証

3.1. 目的

木材の割裂の研究の多くはその目標が現象の解明に向けられており、樹種の差異による耐力の違いを検証した研究は数少ない。特に、木質構造設計規準・同解説¹⁾に記載されている割裂耐力推定式では、割裂破壊定数をパラメータとしているが、割裂破壊定数は密度によって一義的に決まり²⁾、樹種による差異が考慮に入れられていない。このため、割裂破壊定数を樹種ごとに提案することで、より精度の高い耐力推定ができるのではないかと考えた。

そこで、樹種ごとの割裂破壊定数を実験的に計測することを目的として、建材として一般的であるスギ・ヒノキ・カラマツ・ベイマツを用いて、CT試験を行い、データの蓄積を行う。その後計測した割裂破壊定数を用いて、前章で提案した耐力推定式から割裂耐力を推定し、実験値との比較検証を行い、前章で想定した割裂破壊メカニズムは妥当であるか、また、割裂破壊耐力を推定できるか検証することを目的としている。

3.2. 実験

3.2.1. 試験体および試験方法

試験体試験体には、建材として一般的であるスギ(Japanese cedar, 学名 : *Cyptomeria japonica*)・ヒノキ(Japanese cypress, 学名 : *Chamaecyparis obtusa*)・カラマツ(Japanese larch, 学名 : *Larix kaempferi*)・ベイマツ(Douglas fir, 学名 : *Pseudotsuga menziesii*)の無等級製材(断面寸法 120×120mm)の 4m 材から、厚さ 30×長さ 100×幅 120mm の小試験体を切り出し、中間部に幅 2mm×奥行き 65mm のスリットを設けたものとした。スリット長を 65mm としたのは、加力点からスリット底部までの長さ(= a_0)と加力点から試験体材端までの長さ(= W)の比 a_0/W が 0.5~0.6 とすることで比較的安定したき裂進展が見られるためである^{3),4)}。

本試験ではスギ・ヒノキ・カラマツ・ベイマツを用いた試験体をそれぞれ S series、H series、K series、B series と名付けた。スリットは歯振幅 2mm の丸鋸で加工をし、そのままの仕上げとした。加力点には $\phi 17$ の孔を開け、M16 のドリフトピンを通し、加力を行った。試験体は 4m 材一本から切り出し、各 30 体とした。各試験体の仕様について Table 3.1 に示した。基礎物性値は密度、含水率、年輪幅、年輪傾角について測定した。密度は試験前に試験体重量を測定し、その数値を体積で割った商とし、含水率は試験後の試験体を 105°C の温度下で 24 時間乾燥後重量を測定し全乾法で測定した。年輪幅は各試験体の木口での年輪幅を 5 か所程度測定しその平均値とし、年輪傾角は試験体の割裂によって生じた破面と成長輪がなす角度を 5 か所程度測定しその平均値とした。試験方法は Fig. 3.1、Photo 3.1 に示すように鋼製治具を介して試験体を 2 本のドリフトピンで支持し、加力速度を 0.5mm/min とし、単調加力にてスリット肩口の開口変位が 5mm に達するまで加力した。加力にはインストロン社製 4204 型万能試験機を用いた。破壊はいずれの試験体も開口変位が 1mm に達する近辺で起こるため、十分に破壊し、かつ破壊後の荷重低下の様子も観察できる条件となっている。またドリフトピンは塑性曲げを生じず、加力による面圧応力が均一に分布していたと考えられる。試験時の荷重は万能試験機のクロスヘッドに内蔵されているロードセルで、開口変位は試験体のスリット肩口に設置したパイ型変位計で計測した。

Table 3.1 Specifications of test specimens.

Series	Wood species	Average density [kg/m ³]	Average Young's modulus [kN/mm ²]	Average moisture content [%]	Average annual ring width [mm]	Average annual ring angle [°]	Slit length [mm]	Number of specimens	Crack propagation system
S	Japanese cedar	401.8	7.06	12.9	5.34	70.7			LR system
H	Japanese cypress	461.8	7.44	9.11	5.50	52.5	65	30	LR system
K	Japanese larch	537.0	9.31	11.4	3.63	72.6			LR system
B	Douglas fir	625.5	10.9	13.6	1.85	18.5			LT system

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

LR system: Longitudinal radial system, LT system: Longitudinal tangential system.

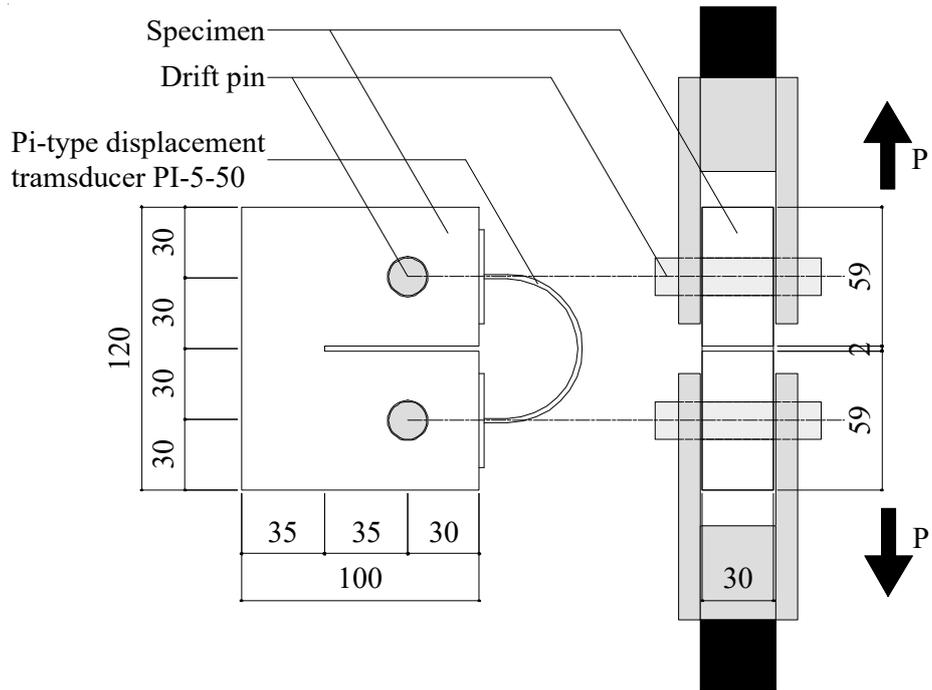


Fig. 3.1 Schematic diagram of the test method.

Note: P: Load, Unit : mm

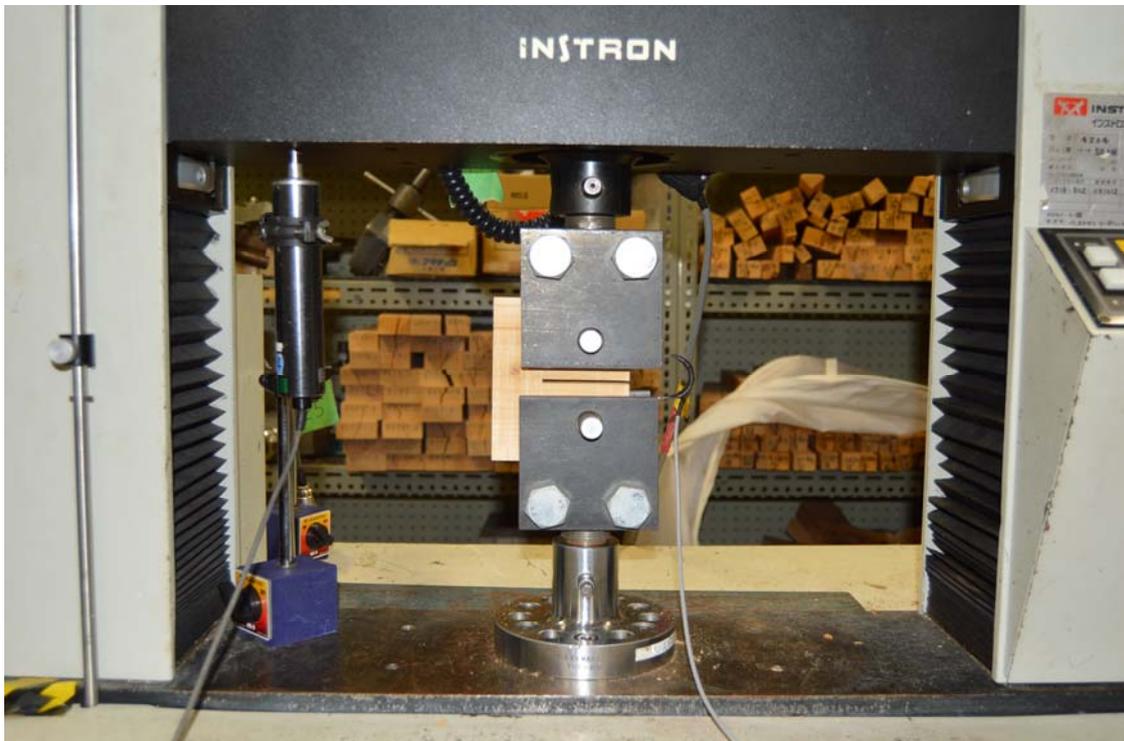


Photo 3.1 Scene of CT test.

3.3. 結果と考察

3.3.1. 破壊性状

破壊性状を Photo 3.2~3.5 に示す。いずれの樹種であっても基本的には高い音が鳴った直後に荷重低下を起こした。その時点では試験体に目視で観察できる割裂は起こらず、数秒後に試験体表面からき裂が発生し、徐々に内部に進展していく様子が観察できた。

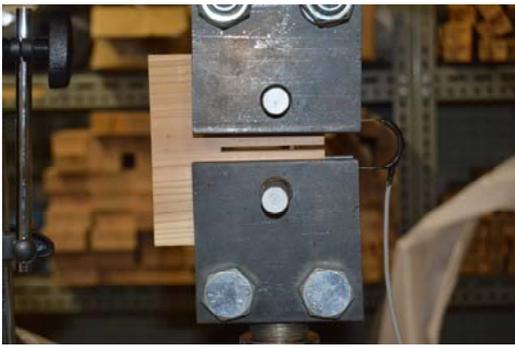


Photo 3.2 Ultimate state of Japanese cedar (S-5).

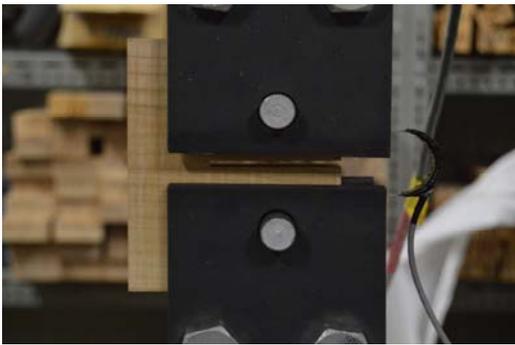
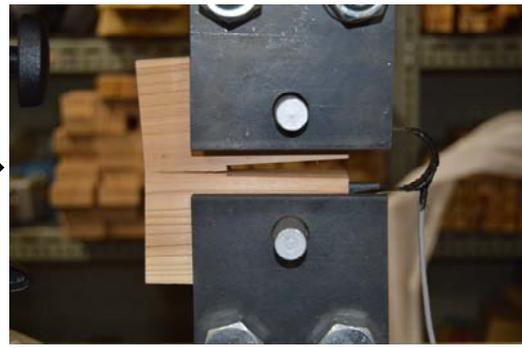


Photo 3.3 Ultimate state of Japanese cypress (H-16).

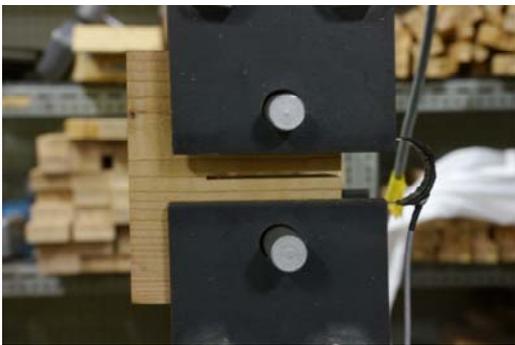
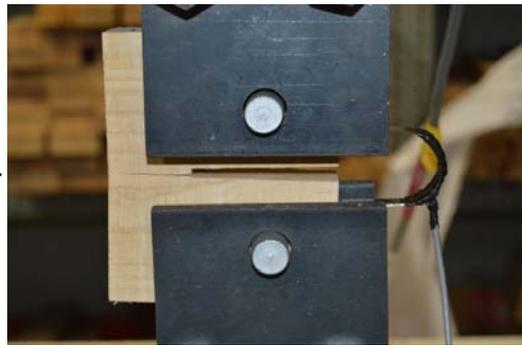


Photo 3.4 Ultimate state of Japanese larch (K-29).

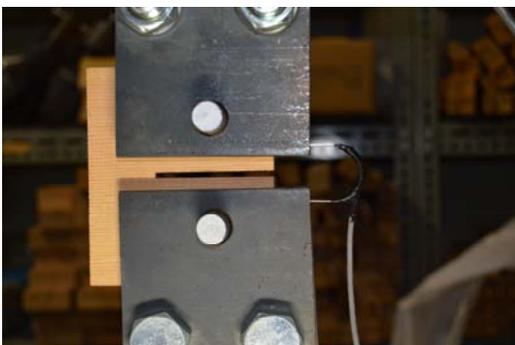
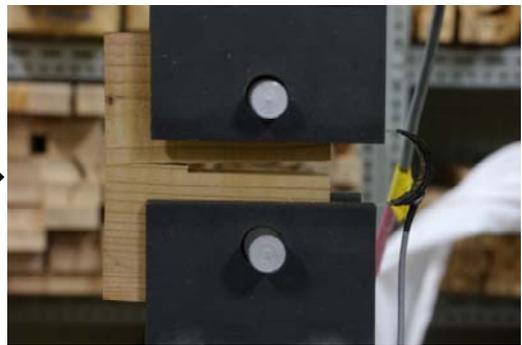
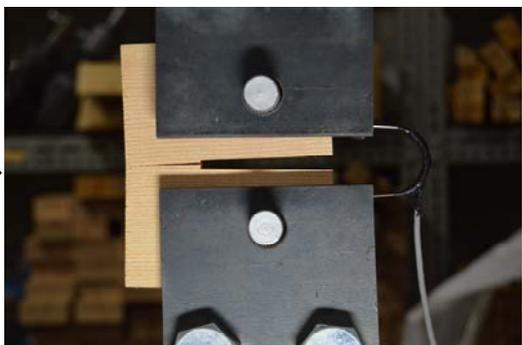


Photo 3.5 Ultimate state of Douglas fir (B-8).



3.3.2. 荷重と変形の関係

試験体の開口変位と荷重の関係を Fig. 3.2 に、試験結果を Table 3.2 に示した。まず最大荷重： P_{max} に着目するとカラマツ、スギ、ヒノキ、ベイマツの順に高くなった。最大荷重時の変位： $\delta_{P_{max}}$ はカラマツとベイマツが同程度で、ヒノキ、スギの順に大きくなった。いずれの試験体も最大荷重時までは荷重と変位の関係が概ね線形であることから、最大荷重時までのエネルギー量： W を最大荷重と最大荷重時の変位の積の1/2と考えると、その平均値は、ヒノキが最大であり、スギ・ベイマツは同程度で、カラマツが最も低かった。単一の製材から試験体を切り出したにも関わらず、ヒノキでは試験体によるバラツキが多かった。割裂破壊は荷重-変位曲線から判断して、最大荷重以降に荷重が一定となる領域がほとんどないことから、総じて概ね塑性変形能力が乏しい破壊現象であると言える。

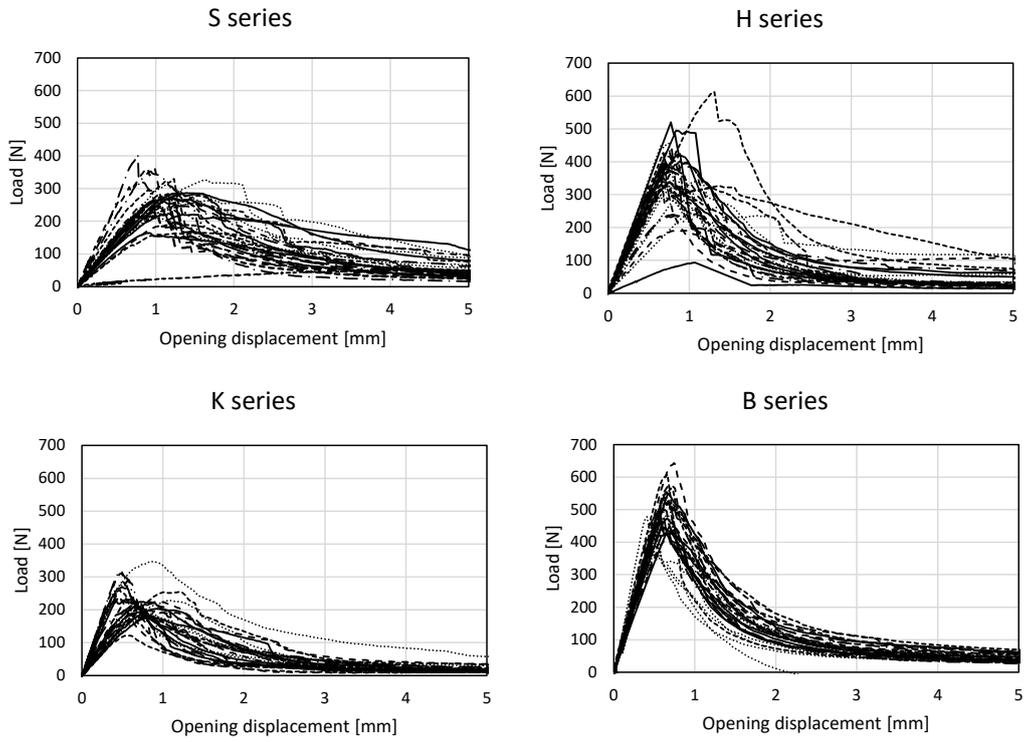


Fig. 3.2 Relationships between load and opening displacement.

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

Table 3.2 Results of CT tests.

Series	Maximum load	Displacement of maximum load	Work to failure	Standard deviation of Energy
	P_{max} [N]	δ_{Pmax} [mm]	W [N·mm]	σ [N·mm]
S	260	1.26	152	42.1
H	366	0.823	299	119
K	228	0.695	78.0	25.3
B	497	0.629	157	31.7

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

3.4. 割裂破壊定数と密度の比較

3.4.1. CT 試験による割裂破壊定数の算出方法

割裂破壊定数とは安村らによって提案された割裂破壊を定めるパラメータの一つであり⁵⁾、以下の式で表される。

$$C_{\gamma} = \sqrt{\frac{G \cdot G_c}{0.6}} \quad (3.1)$$

ここで、 C_{γ} ：割裂破壊定数(N/mm^{1.5})、 G ：せん断弾性係数(N/mm²)、 G_c ：エネルギー開放率(N/mm)

また岩崎らの研究⁶⁾より密度から一義的に定まる計算式も提案されている。

$$C_{\gamma} = 39.6\gamma_0 - 4.44 \quad (3.2)$$

ここで、 γ_0 ：木材の基準比重⁷⁾

一方で、木材の割裂破壊現象は線形で荷重値が上昇していき、最大荷重を迎えた時に脆性的に破壊していく現象として捉えられるので、線形破壊力学を適用可能と考えられる。線形破壊力学においてエネルギー開放率と J 積分値は同値であることから、式(3.3)が成り立つ。

$$G_c = J \quad (3.3)$$

ここで、 J ：J 積分値(N/mm)

J 積分値の評価方法はいくつかあるが、木材を対象にした CT 試験においても、本試験体のように加力点からスリット底部までの距離と加力点から材端までの距離の比率 a/W が 0.5～0.6 の場合、安定的な評価が得られるとの報告がある^{3) 4)}。そのため、Clarke⁸⁾らの簡便式を用いて評価を行うと、J 積分値は以下のように表される。

$$J = \frac{A}{(B \cdot b)} \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.4)$$

ここで、

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(2 \frac{1+\beta}{1+\beta^2}\right) \quad (3.5)$$
$$\beta = \left\{ \left(\frac{2a}{b}\right)^2 + 2 \left(\frac{2a}{b}\right) + 2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right)$$

ここで、 A ：最大荷重までのエネルギー量(N・mm)、 B ：材幅(mm)、 a ：加力点からスリット底部までの距離(mm)、 W ：加力点から材端までの距離(mm)、 b ：スリット底部から材端までの距離(mm)

式(3.1)および式(3.3)より実験に基づく割裂破壊定数を算出することができる(以下、実験値と呼ぶ)。なお、ここで用いたせん断弾性係数は木規準に記載されている値を用いた。

一方で、式(3.2)より試験体の基準比重からも割裂破壊定数を算出することができる(以下、計算値と呼ぶ)。計算値は簡易的に計算できる反面、樹種による違いを評価できず、危険側の評価になる可能性が指摘されている⁹⁾。

3.4.2. 割裂破壊定数と密度の比較

3.4.1 の方法で算出した割裂破壊定数の平均値と 5%下限値を Table 3.3 に、割裂破壊定数と密度の関係を Fig. 3.3 に示した。スギ・ヒノキ・ベイマツの樹種群の割裂破壊定数は密度に対して線形に近い分布を示したが、カラマツは同程度の密度であったヒノキに比べ約 0.69 倍の数値となった。

Table 3.3 Average and 95% lower limit tolerance values of fracture parameter C_γ of CT tests.

Series	S	H	K	B
	C_γ [N/mm ^{1.5}]			
Fracture parameter C_γ average experimental value	15.84	17.67	12.24	19.31
Fracture parameter C_γ 95% lower limit tolerance value at 75% confidence level	11.70	11.50	8.55	15.53

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

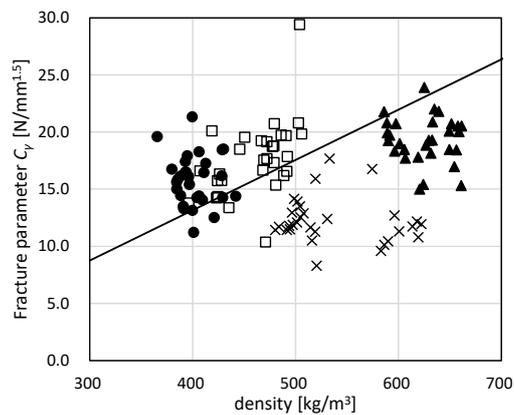


Fig. 3.3 Relationships between fracture parameter C_γ and density.

Legend : ● : S series, □ : H series, × : K series, ▲ : B series, — : Calculated value

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

3.5. 計算値と実験値の比較

2.4 節で提案した耐力推定式によって算出した計算値と実験値を比較し、Table 3.4、Fig. 3.4 に示す。スギ・カラマツは実験値と計算値がよく一致し、ヒノキ・ベイマツにおいても安全側に評価できた。変形成分で最も大きく支配的であったのは支点での回転変形であり、試験体の年輪傾角の平均値がそれぞれ 70.7°、72.6°であったスギとカラマツでは T 方向の変形成分が多く、算出する際の $E_T=1/20E$ の仮定が妥当であったと言える。一方でヒノキ、ベイマツ試験体の平均年輪傾角は 52.5°、18.5°であり、R 方向（半径方向）の変形に近い。そのため、計算値が実験値より下回る結果となったと考えられる。

本提案式で CT 試験体における割裂耐力推定は概ね可能であると言える。しかし、実際の構造物に応用する場合、例えば余長が十分に長い場合はリガメント部の支点での境界条件がより剛に近くなり、本報で提案した計算式での変形量が過大になる可能性があるという課題がある。

Table 3.4 Relationships of splitting strength between calculated and experimental values.

Series	Experimental value [N]	Calculated value [N]	Correlation coefficient R
S	260	276	0.608
H	366	280	0.829
K	228	230	0.372
B	497	350	0.871

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

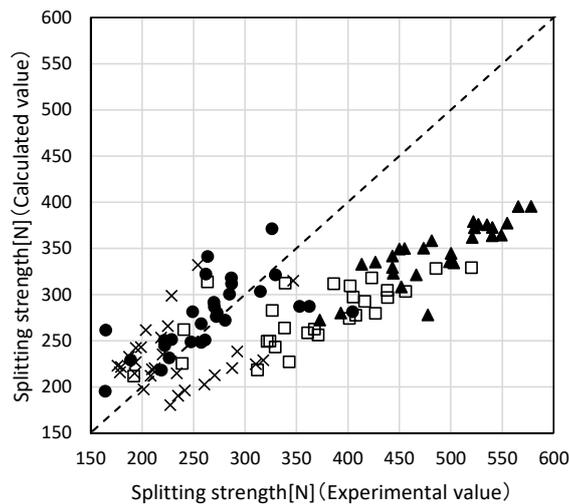


Fig. 3.4 Relationships between calculated and experimental values of splitting strength.

Legend : ● : S series, □ : H series, × : K series, ▲ : B series

Note: S: Japanese cedar, H: Japanese cypress, K: Japanese larch, B: Douglas fir.

3.6. まとめ

建材として一般的である、スギ・ヒノキ・カラマツ・ベイマツ製材を用いて CT 試験を行い、割裂破壊定数を算出すると共に、線形破壊力学を適用し、第 2 章で提案した CT 試験体における割裂耐力推定式の検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 割裂耐力及び割裂耐力の推定に必要となるパラメータは密度によって算定されるが、樹種による影響も大きく、特にカラマツは、密度がヒノキと同程度であるものの、割裂耐力やエネルギー量が低く、木規準¹⁾に則り設計を行う場合、危険側となる場合がある。
- 2) 第 2 章で提案した割裂耐力推定式で、スギやカラマツの割裂耐力は概ね推定可能であったが、ヒノキやベイマツでは計算値が実験値を下回った。年輪傾角の影響と考えられ、変形量の評価が過大になったためだと考えられる。ただし、評価としては安全側の評価となった。
- 3) 第 2 章の提案式で CT 試験体での割裂耐力の推定が概ね可能であり、想定していたメカニズムは概ね妥当であったと考えられる。しかし、十分に余長が取れている場合などは境界条件が異なるため、想定している変形量が過大に評価される可能性があるなど課題も考えられた。

本研究において、提案した割裂耐力推定式は、CT 試験体の耐力を推定できるということに留まっており、実際の接合部に適用するには課題があると考えられる。そのため、通常のボルト又はドリフトピン接合部におけるモーメント抵抗に対する割裂耐力推定式や腰掛け鎌継ぎといった継手仕口接合部の顎部から発生する割裂耐力推定式に適用できる形に落とし込むということが今後の課題として考えられる。

4. 接合具の曲げを考慮した縦割裂試験とその考察

4.1. 目的

前章までは繊維直交方向加力時の割裂耐力の推定方法を目的としてきたが、本章では繊維方向加力時の割裂耐力の推定方法を提案することを目的としている。

繊維方向加力時の割裂破壊(以下、縦割裂)は、曲げ降伏型接合具を用いた木造建築物の接合部などで弱点となることが知られており^{1),2)}、急激な耐力低下につながるため、避けるべき破壊である。繊維方向加力時の割裂破壊の研究は多くなく、現在、一般的に用いられている耐力推定手法はなく、それを提案する事が急務である。繊維方向加力時の割裂破壊は第2章・第3章で着目していたCT試験と異なり、主応力がせん断応力となる破壊であり、耐力推定法の提案のためには、破壊発生時にどのような応力分布になり、どの程度の応力レベルに達した時に破壊が発生するのか、ということを確認にする必要がある。

木質構造設計規準³⁾(以下、木規準)では繊維方向加力時の割裂破壊については、それを回避するように十分に端距離や端距離を取って設計するように示されている。例えば、ドリフトピン接合における繊維方向加力時の荷重負担側の端距離は7d以上の余長を確保するように示されており、これについて検証する研究も行われている⁴⁾⁻⁶⁾。

他にも、田中らは縁端距離、材厚及び接合具径をパラメータに、鋼板添え板ボルト接合部の様々な条件下でのせん断性能について研究している^{7),8)}。これに類似した研究は数多くあるが、いずれも破壊モードについての言及は乏しい。

一方で、Hanhijärviらは、Jorissenのモデルを基に、Sjödínらによる応力分布から接合具孔及び材端から発生する割裂の耐力を推定する方法を提案している⁹⁾⁻¹¹⁾。桑村は、材厚、縁端距離およびボルトの仕上げ面の粗さをパラメータに鋼板添え板ボルト接合における割裂などの破壊形式に注目して実験を行い、耐力推定式を提案している^{12),13)}。しかし、いずれの研究も限られた樹種での研究であることやボルトの径長比が小さい場合に限られることなど、適用できる条件が限定されている点で更なる検討の余地がある。

そこで、特に割裂の破壊形式に注目し、径長比の大小を含め、縁端距離、接合具径、樹種、材厚のパラメータを変化させた試験体について、網羅的に実験を行うことで、割裂耐力推定法を提案するための有用なデータの収集になると考えた。ちなみに、ここでいう割裂破壊とはせん断破壊と区別するため、“鋼板添え板ドリフトピン接合部でドリフトピンが母材に支圧応力を加えた時に起きる破壊形式の内、き裂面が1面となるもの”と定義する。また、“上述の破壊形式の内、き裂面が2面となるもの”はせん断破壊と定義する。本試験では、この二つのモードだけに明確に分類できず、例えば破壊の起点では2面にき裂面が形成されるが、進展する際に1面に収束していくモードなど、二つのモードが混在した試験体も存在したが、その場合、初期のき裂に関わらず、き裂の進展が1面のものは前者、2面のものを後者と判断した。

本報は、鋼板添え板ドリフトピン接合部における繊維方向に荷重を加えた場合の製材の割裂試験(必ずしも破壊形式が割裂破壊だけにはならなかったが、便宜上“縦割裂試験”と呼ぶことにする)を実施し、樹種・ドリフトピン径・縁端距離・材厚のパラメータが、破壊形式や強度に与える影響を明らかにすることを目的とする。

4.2. 実験

4.2.1. 試験体及び試験方法

試験体は建材として一般的であるスギ(Japanese cedar, 学名 : *Cyptomeria japonica*)・ベイマツ(Douglas fir, 学名 : *Pseudotsuga menziesii*)の製材から切り出した Fig. 4.1 の形状のものとした。試験体上部は 2 枚の鋼板を添え板としたビス接合とし、十分に補強をすることで破壊を起こさないようにした。一方、下部は 2 枚の鋼板を添え板としたドリフトピン接合としてドリフトピンの円孔際から繊維方向に割裂破壊を生じさせるようにした。なお、鋼板と母材が接する面にはシリコンスプレーを塗布し、摩擦が生じないようにした。試験体は樹種以外にも、接合具径・端距離・縁距離・材厚のパラメータを変化させた。接合具はドリフトピンとし、材質は SS400、径は 12mm と 16mm とした。接合具を差し込む孔は、鋼板側はクリアランスを 1mm 考慮して 13mm と 17mm の孔を開け、母材側はドリルドライバーで $\phi 12\text{mm}$ 、16mm のビットを使用して孔を開けたためクリアランスはほぼ無視しえる。端距離は、木規準での最低寸法の 7d を基準とし、それに加えて、2d、4d、10d の計 4 種類とした。縁距離はドリフトピンの両側の縁について木規準での最低寸法の 1.5d を基準とし、3d、6d、9d の計 4 種類とした。材厚は 30mm、60mm、90mm、120mm とした。これらのパラメータを組み合わせ、Table 4.1 のように各樹種・ピン径毎に 25 種類の計 100 種類の仕様について試験を行った。試験体は各仕様につき 6 体とし、試験体名は樹種の頭文字(スギは S、ベイマツは B)+ドリフトピン径(12、16)+仕様のシリーズ名(A~Y)と名付けた。加力は万能試験機((株)島津製作所 AUTOGRAPH AG-IS 100kN)を用いた単調引張加力で、加力速度を 5mm/min とし、荷重値が最大荷重に達した後、最大荷重の 8 割まで荷重が低下するか、側材の鋼板と試験体中央部との相対変位が 30mm に達するまで行った。試験時の荷重は万能試験機クロスヘッド内蔵のロードセルを用いて計測し、変位は側材の鋼板と試験体中間部の相対変位及びクロスヘッドの絶対変位について変位計を用いて計測した(Fig. 4.2)。

試験後の試験体は、105°Cで 24 時間以上乾燥させたのち含水率を計測し、また健全部から断面寸法 20~30mm 角、長さ 300mm 程度の試験体を切り出してスパン 250mm で三点曲げ試験を行い曲げヤング率を計測した。

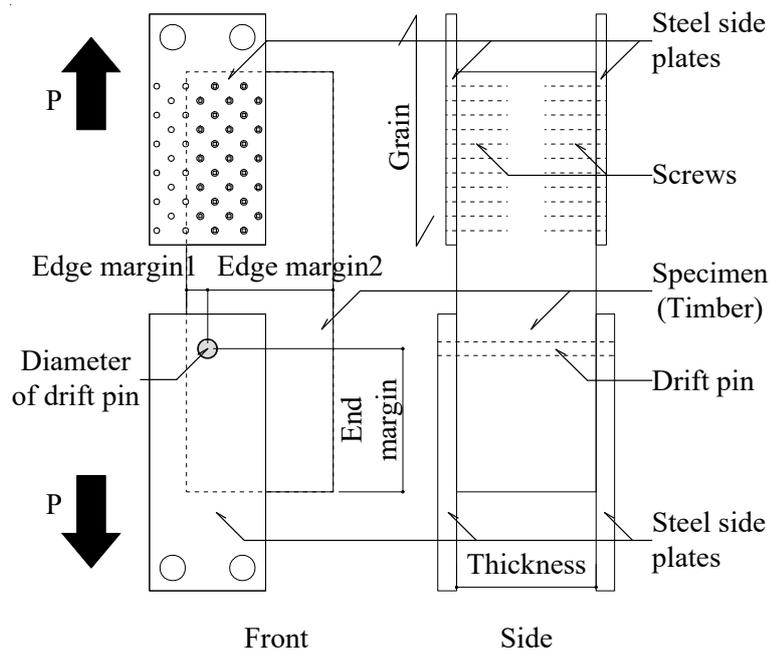


Fig. 4.1 Schematic diagram of the test method.

Note: P: Load.

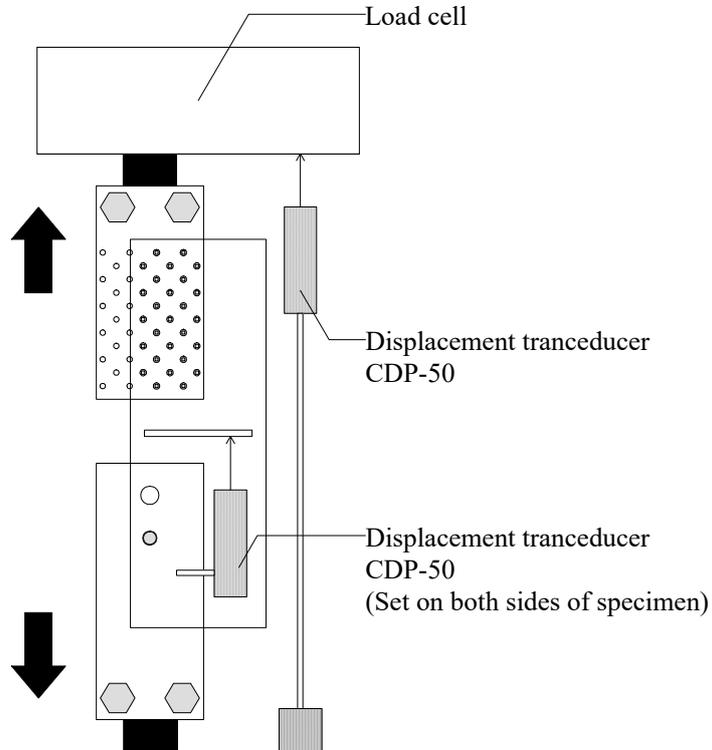


Fig. 4.2 Sensor arrangement in the test.



Photo 4.1 Scene of splitting test.

Table 4.1 Configuration of the test specimens.

Specimen	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Number of specimen	
				1	2			
A	Japanese Cedar (S) Douglas Fir (B)	12	7d	1.5d	1.5d	120	6	
B				1.5d	3d			
C				1.5d	6d			
D				1.5d	9d			
E				3d	9d			
F				6d	9d			
G				9d	9d			
H				1.5d	1.5d			
I				1.5d	9d			120
J				9d	9d			
K		1.5d	1.5d					
L		4d	9d	120				
M		9d	9d					
N		16	10d	1.5d	1.5d	120		
O				1.5d	9d			
P				9d	9d			
Q				1.5d	1.5d			
R				7d	9d			30
S				9d	9d			
T				1.5d	1.5d			
U	7d			9d	60			
V	9d			9d				
W	1.5d	1.5d						
X	7d	9d	90					
Y	9d	9d						

Note: d: Diameter of drift pin(mm), Unit: mm.

4.3. 結果と考察

以下の各節では議論・考察のしやすさを考え、抜粋した試験結果を全ての試験結果を図表として示しており、別添する付録 A)に全ての試験結果をまとめて示す。

4.3.1. 破壊性状

試験体のタイプ毎の代表的な破壊性状を Table 4.2~4.5 に示す。本試験での破壊モードは大きく分けて、割裂破壊とせん断破壊の 2 種類になる。そのモード差は端距離の影響が変化し、概ね端距離が $4d$ 以下であるとせん断破壊、端距離がそれ以上になると割裂破壊となる傾向が見られた。この破壊モードの傾向を Table 4.6 にまとめた。

また、材厚が薄く、ドリフトピンが太い試験体ではドリフトピンの曲げ変形がほとんど生じない。その場合、ドリフトピンから母材への支圧応力は均等に伝達される。一方で、材厚が厚く、ドリフトピンが細い試験体ではドリフトピンの曲げ変形が大きい。その場合、ドリフトピンの変位が大きい箇所ほど、支圧応力が大きくなる。すなわち、支圧応力度は鋼板側で大きく、母材中央で小さいという分布になると想定される。この応力度の分布の違いによっても異なる破壊性状が見られる。前者では、き裂発生からその進展の速度が速く、数秒で試験体全厚に及び破壊に至る。後者では、まず母材の片側の縁に部分的なき裂が発生する。その後、き裂が反対側の縁へ徐々に進展し、試験体全厚に至る破壊と、反対側の縁にもき裂が発生し、2 つのき裂が徐々に進展し、中央でつながる破壊の 2 つのモードが観察された。いずれのモードにおいても、き裂が材厚全体に伝播することで、母材がき裂部分から繊維直交方向に広がって、ドリフトピンが母材によって支持できなくなることによって荷重低下が起きた。繊維直交方向荷重時の鋼板添え板ビス接合についてはあるが、Zarnani らは、これらと同様の破壊性状について報告しており¹⁴⁾、本報ではそれに倣い、前者の破壊性状を“Full width splitting(shear)”，後者を“Partial width splitting(shear)”と名付けた。これらの破壊モードの傾向について、Table 4.7 にまとめた。

Table 4.2 Results and specifications of the test specimens.

(Japanese cedar / Drift pin φ12)						
Specimen	Average density (kg/m ³)	Average moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Average splitting strength (kN)	Main failure mode	
S12A	373.4	12.78	4.53	24.57	Splitting	
S12B	382.1	13.92	4.53	27.73	Splitting	
S12C	389.7	14.15	4.53	29.77	Splitting	
S12D	389.4	9.97	5.45	29.24	Splitting	
S12E	386.4	13.01	4.73	30.22	Splitting	
S12F	385.4	12.55	4.73	31.82	Splitting	
S12G	390.0	12.99	4.73	32.34	Splitting	
S12H	378.2	13.21	4.53	9.34	Shear	
S12I	401.1	10.06	5.45	11.99	Shear	
S12J	368.2	10.59	4.31	14.31	Shear	
S12K	382.9	12.67	4.53	18.64	Shear	
S12L	395.5	9.35	5.45	22.74	Shear	
S12M	376.9	11.10	4.73	25.93	Shear	
S12N	373.7	12.09	4.53	24.03	Splitting	
S12O	393.4	10.10	5.45	31.01	Splitting	
S12P	398.1	10.85	5.06	33.18	Splitting	
S12Q	376.8	9.29	5.06	9.89	Splitting	
S12R	426.9	14.70	5.06	9.74	Splitting	
S12S	403.6	12.70	5.06	10.84	Splitting	
S12T	363.6	10.18	5.06	16.04	Splitting	
S12U	418.9	17.63	5.06	15.97	Splitting	
S12V	408.7	16.61	5.06	15.44	Splitting	
S12W	363.8	10.82	5.06	21.43	Splitting	
S12X	426.4	22.47	5.06	23.24	Splitting	
S12Y	406.0	14.61	5.06	25.08	Splitting	

Table 4.3 Results and specifications of the test specimens.

(Japanese cedar / Drift pin φ16)						
Series	Average density (kg/m ³)	Average moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Average splitting strength (kN)	Main failure mode	
S16A	378	11.9	4.53	35.7	Splitting	
S16B	387	12.1	4.53	38.7	Splitting	
S16C	382	9.52	4.53	42.2	Splitting	
S16D	381	10.6	4.73	42.3	Splitting	
S16E	381	11.1	4.73	44.1	Shear	
S16F	391	8.76	4.73	47.1	Splitting	
S16G	350	10.0	4.31	44.6	Splitting	
S16H	367	12.3	4.53	18.8	Shear	
S16I	388	9.16	5.45	18.6	Shear	
S16J	347	11.0	4.31	21.6	Shear	
S16K	373	12.7	4.53	32.1	Shear	
S16L	381	9.44	5.45	35.2	Shear	
S16M	346	9.42	4.31	35.0	Shear	
S16N	376	11.6	4.53	40.9	Splitting	
S16O	381	7.61	5.45	42.9	Splitting	
S16P	354	9.10	4.31	45.5	Splitting	
S16Q	384	10.6	5.06	12.5	Splitting	
S16R	397	10.5	5.06	12.7	Splitting	
S16S	358	9.97	4.31	11.9	Splitting	
S16T	367	11.3	5.06	21.2	Splitting	
S16U	402	12.4	5.06	22.3	Splitting	
S16V	359	12.4	4.31	21.1	Splitting	
S16W	373	11.1	5.06	32.0	Splitting	
S16X	393	12.9	5.06	32.7	Splitting	
S16Y	356	11.1	4.31	35.1	Splitting	

Table 4.4 Results and specifications of the test specimens.

(Douglas fir / Drift pin ϕ 12)						
Series	Average density (kg/m ³)	Average moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Average splitting strength (kN)	Main failure mode	
B12A	631	15.1	8.83	28.7	Splitting	
B12B	620	13.0	8.83	30.0	Splitting	
B12C	624	11.3	8.83	34.4	Splitting	
B12D	517	11.7	6.93	32.5	Splitting	
B12E	510	11.7	6.84	39.0	Splitting	
B12F	499	9.96	6.84	36.3	Splitting	
B12G	507	8.63	6.84	36.1	Splitting	
B12H	614	12.3	8.83	12.9	Shear	
B12I	498	12.5	6.93	13.0	Shear	
B12J	480	12.2	6.67	14.3	Shear	
B12K	608	13.9	8.83	23.3	Shear	
B12L	496	11.5	6.93	24.0	Splitting	
B12M	510	11.1	6.84	27.4	Shear	
B12N	632	14.5	8.83	31.5	Splitting	
B12O	500	8.87	6.93	31.7	Splitting	
B12P	490	10.8	6.92	32.7	Splitting	
B12Q	527	12.4	6.92	13.0	Splitting	
B12R	508	12.8	6.92	12.0	Splitting	
B12S	513	13.1	6.92	10.0	Splitting	
B12T	510	13.1	6.92	22.5	Splitting	
B12U	480	14.0	6.92	17.7	Splitting	
B12V	480	14.1	6.92	20.8	Splitting	
B12W	526	13.5	6.92	26.4	Splitting	
B12X	487	13.0	6.92	26.6	Splitting	
B12Y	497	10.2	6.92	27.5	Splitting	

Table 4.5 Results and specifications of the test specimens.

(Douglas fir / Drift pin ϕ 16)						
Series	Average density (kg/m ³)	Average moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Average splitting strength (kN)	Main failure mode	
B16A	606	15.4	8.83	40.0	Splitting	
B16B	612	12.7	8.83	48.0	Splitting	
B16C	619	9.65	8.83	46.4	Splitting	
B16D	500	11.0	6.84	56.4	Splitting	
B16E	511	11.2	6.84	60.0	Splitting	
B16F	506	8.76	6.84	58.0	Splitting	
B16G	479	12.2	6.67	49.7	Splitting	
B16H	635	14.5	8.83	21.4	Shear	
B16I	500	11.9	6.93	19.5	Shear	
B16J	483	12.0	6.67	19.3	Shear	
B16K	629	14.4	8.83	39.1	Shear	
B16L	512	12.7	6.93	37.5	Splitting	
B16M	468	11.3	6.67	29.6	Splitting	
B16N	623	13.7	8.83	51.7	Splitting	
B16O	498	10.5	6.93	48.5	Splitting	
B16P	480	11.6	6.67	54.6	Splitting	
B16Q	534	12.8	6.92	16.3	Splitting	
B16R	510	11.5	6.92	14.8	Splitting	
B16S	485	12.4	6.67	12.4	Splitting	
B16T	519	13.4	6.92	28.2	Splitting	
B16U	478	12.1	6.92	26.1	Splitting	
B16V	488	12.9	6.67	26.4	Splitting	
B16W	516	13.1	6.92	42.2	Splitting	
B16X	483	13.0	6.92	41.7	Splitting	
B16Y	476	12.5	6.67	35.1	Splitting	

Table 4.6 Failure mode of drift pinned joint with steel side plates. (Cases of end margin).

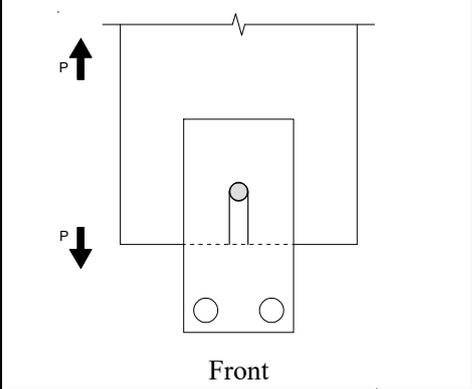
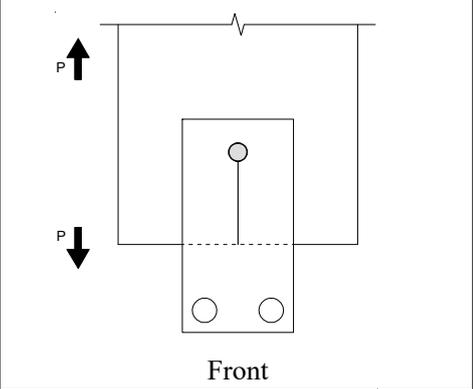
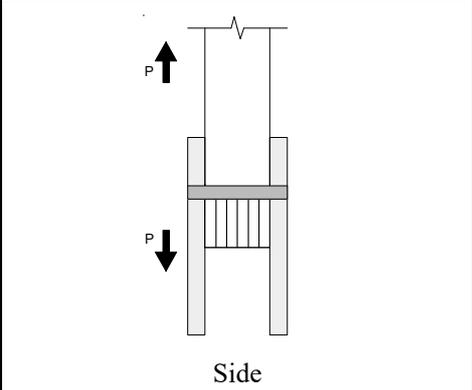
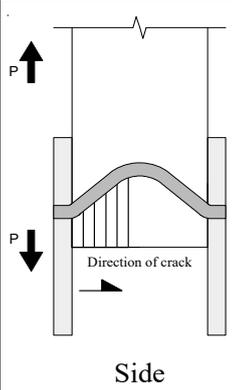
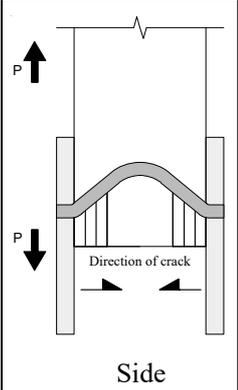
End margin	Short	Long
Failure mode	Shear	Splitting
	 <p>Front</p>	 <p>Front</p>

Table 4.7 Failure mode of drift pinned joint with steel side plates. (Cases of thickness).

Thickness	Thin	Thick	
Failure area	Full width splitting (shear)	Partial width splitting (shear)	
		One side	Both sides
Failure mode	 <p>Side</p>	 <p>Side</p>	 <p>Side</p>

4.3.2. 荷重と変形の関係

代表的な試験体の荷重変位関係を Fig. 4.3 に示す。本試験における荷重変位曲線は蒲池らの研究²⁾によると、Fig. 4.4 の形で表される。すなわち、鋼板添え板ドリフトピン接合部は、①ドリフトピンが母材に支圧応力を与えることで起きる弾性めり込み挙動、②母材の支圧降伏もしくは、ドリフトピンの曲げ降伏による二次勾配への推移、③ドリフトピン端部の鋼板による回転拘束での荷重上昇、④割裂破壊もしくはせん断破壊による荷重低下、というように耐力発現していると考えられる。ただし、材厚が 30mm や 60mm のように薄い試験体では、終局状態に達するまでのドリフトピンの変形が小さいため、ドリフトピン端部の鋼板による回転拘束が起らず、③の荷重上昇が起きずに破壊に至った。また、端距離が 2d や 4d のように極端に短い試験体についても、ドリフトピンが十分に変形するより前に破壊に至るためドリフトピン端部の回転拘束による③の荷重上昇は見られなかった。

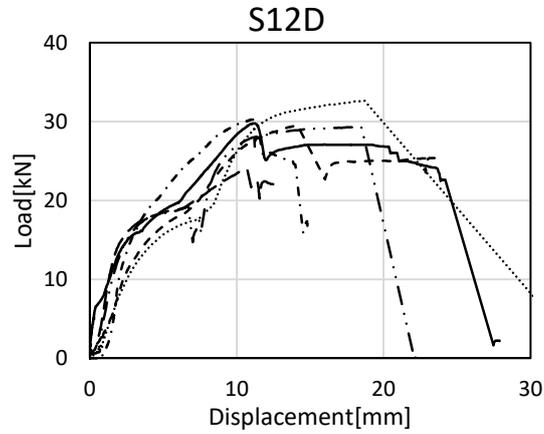


Fig. 4.3 Example of load-displacement curve. (Specimen: S12D).

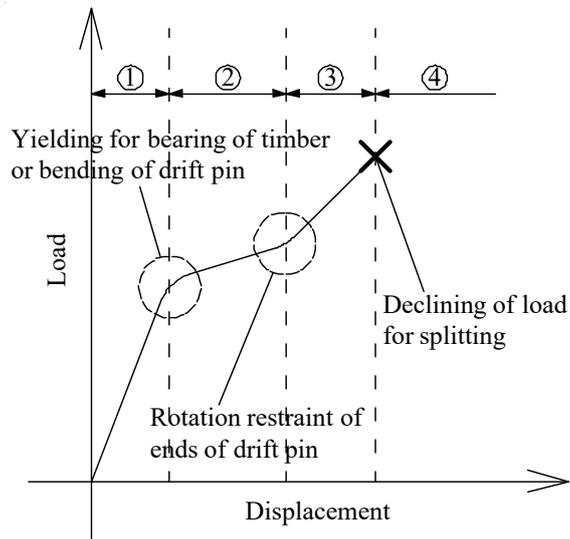


Fig. 4.4 Structural mechanism of the drift pinned joint with steel side plates.

Note: ①: Elastic behavior by bearing force, ②: Secondary stiffness for yielding, ③: Load rising by rotation restraint, ④: Load declining by failure.

4.4. 割裂破壊の各パラメータによる影響

4.4.1. 樹種による影響

本試験結果より、ベイマツの割裂耐力はスギの約 1.19 倍となった。3 章で報告した割裂破壊定数 C_y のスギに対するベイマツの比率は 1.22 倍となりほぼ同値となる。

ただし、端距離が 4d 以下で破壊モードが概ねせん断破壊となる試験体では、スギのせん断耐力に対するベイマツの比率は約 1.09 倍で、割裂耐力に比べ樹種による耐力の差は 1 割程度小さかった。

4.4.2. ドリフトピン径による影響

本試験結果より、いずれの樹種もドリフトピン径 $\phi 16$ の割裂耐力は、 $\phi 12$ と比べ約 1.45 倍となった。ドリフトピン自体の投影面積の比は 1.33 倍であるが、それに比べ 1 割程度耐力が上昇していた。ただし、材厚 30mm と 60mm の試験体に限ってみると、ドリフトピンの曲げ変形が少ない分、ドリフトピンの径による影響は投影面積の比に近くなり、 $\phi 16$ の割裂耐力に対する $\phi 12$ の比率は 1.29 倍となった。

4.4.3. 端距離による影響

端距離と破壊荷重の関係を樹種・ドリフトピン径ごとに整理した結果を Fig. 4.5 に示す。Fig. 4.5 は端距離が 2d の試験体 I、4d の L、7d の D、10d の O を比較している。これらの試験体は端距離以外の条件が、材厚が全て 120mm、縁距離が全て 1.5d-9d という条件になっている。それぞれの試験体の主な破壊性状は端距離が 2d・4d の試験体ではせん断破壊、7d・10d の試験体では割裂破壊となった。ただし、終局状態において、母材の破壊に達する前にドリフトピンが鋼板添え板から滑落した試験体もあり、それらについてはデータから除外した。これは Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 においても同様である。

4.3.1 項で述べたように、端距離が短いとせん断破壊となり、長くなるにつれ、割裂破壊へモードが移行した。せん断破壊による耐力は(4.1)式により表される³⁾。

$$P_{us} = A_{es} \times F_s \quad (4.1)$$

P_{us} : せん断耐力(N)、 A_{es} : せん断の有効面積(mm²)、 F_s : せん断の基準強度(N/mm²)

(4.1)式より、端距離が長くなると、せん断の有効面積が大きくなるため、せん断破壊荷重は大きくなるが一方で、本試験結果より割裂破壊荷重は端距離が 7d 以上確保できている場合、ほぼ一定である。

既報^{3),4),15)}によると樹種の違いはあるが径長比が小さい場合は、端距離が概ね 4.5d~6d で割裂破壊荷重が一定となり、径長比が十分に大きい場合は、端距離が 8d 付近で一定となる。本試験では、材厚が 120mm の試験体ではドリフトピン φ12 で径長比が 10、φ16 で 7.5 と十分に大きいと言えるが、破壊形式から見ても 4d~7d の間でせん断破壊と割裂破壊のモードの移行があったと考えられる。つまり、Fig. 4.5 の点線のように端距離が短い場合は、せん断破壊となり破壊荷重が端距離に線形比例となるが、端距離が 4d~7d の間で、割裂破壊に移行し、破壊荷重が一定になったと言える。

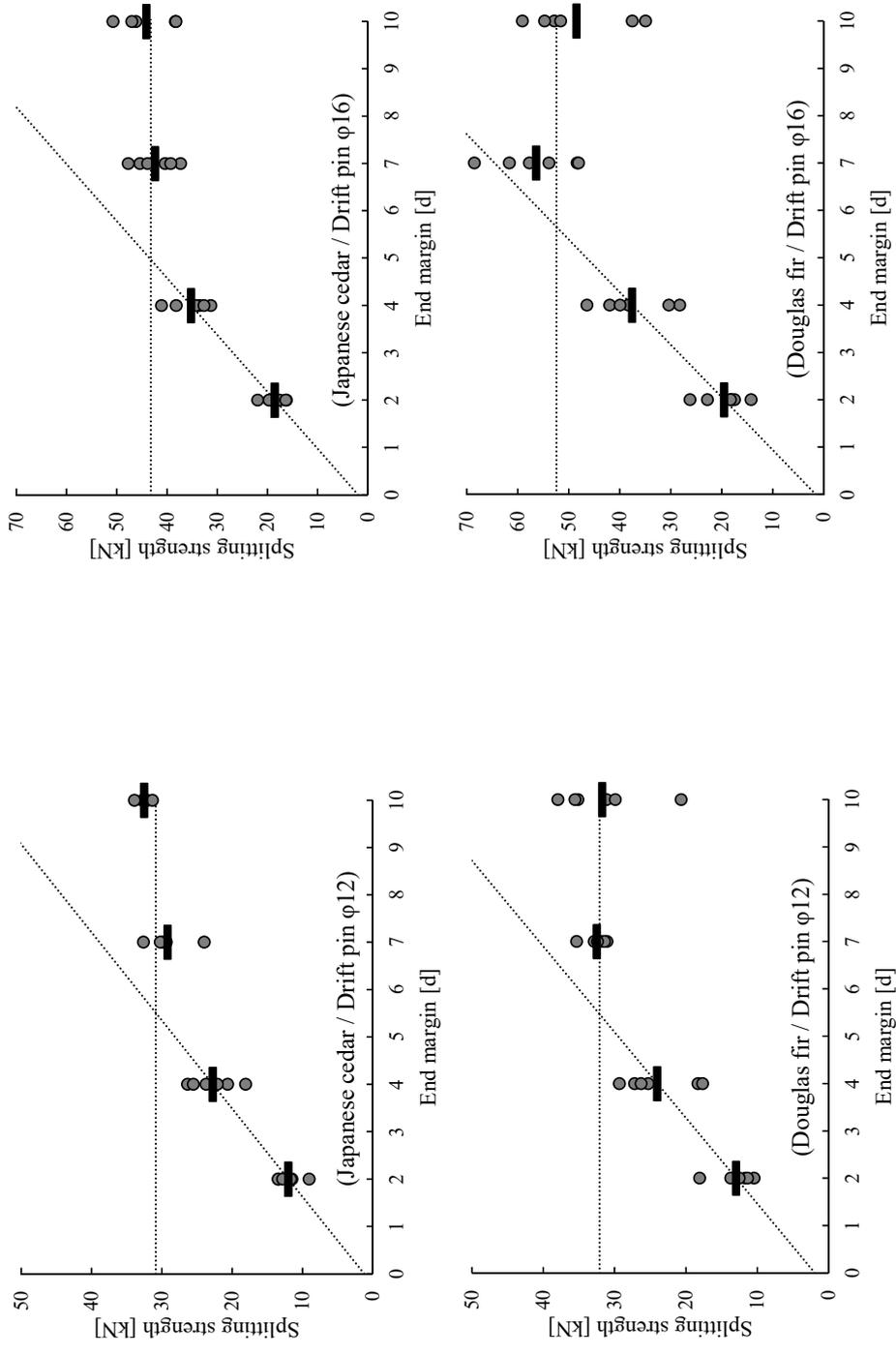


Fig. 4.5 Relationships between splitting strength and end margin.

Legend: ●: Experimental value, —: Average value,: Approximation line.

Note: d: Diameter of drift pin. End margin is expressed multiple of diameter of drift pin.

4.4.4. 縁距離による影響

縁距離と割裂破壊荷重との関係を樹種・ドリフトピン径ごとに整理した結果を Fig. 4.6 に示す。Fig. 4.6 は縁距離が接合具の両側で $1.5d \sim 9d \times 1.5d \sim 9d$ である試験体 A~G を比較している。これらの試験体は縁距離以外の条件が、端距離が全て $7d$ 、材厚が全て 120mm という条件になっており、主な破壊性状が概ね割裂破壊となった試験体である。

既往の研究³⁾では材厚が薄く、径長比が 1.25 かつ端距離が十分である時では、縁距離が $1.5d$ 以上であればそれ以上確保できていても、割裂耐力に与える影響はほとんどないと結論付けている。しかし本試験のように、径長比が十分に大きい場合、縁距離が左右で十分に確保できるにつれ、縁距離が $1.5d$ - $1.5d$ の試験体(Fig. 4.6 の点線はその割裂耐力の平均値を表している)と比べて、耐力が $1 \sim 2$ 割程度上昇する。具体的には、樹種がスギの場合は、材厚 90mm 以上の試験体で、ベイマツの場合は、材厚が 120mm の試験体で、このような傾向が見られた。

一方で、径長比がそれ以下の試験体では、既往の研究と同様に縁距離による耐力の上昇がほとんど見られなかった。

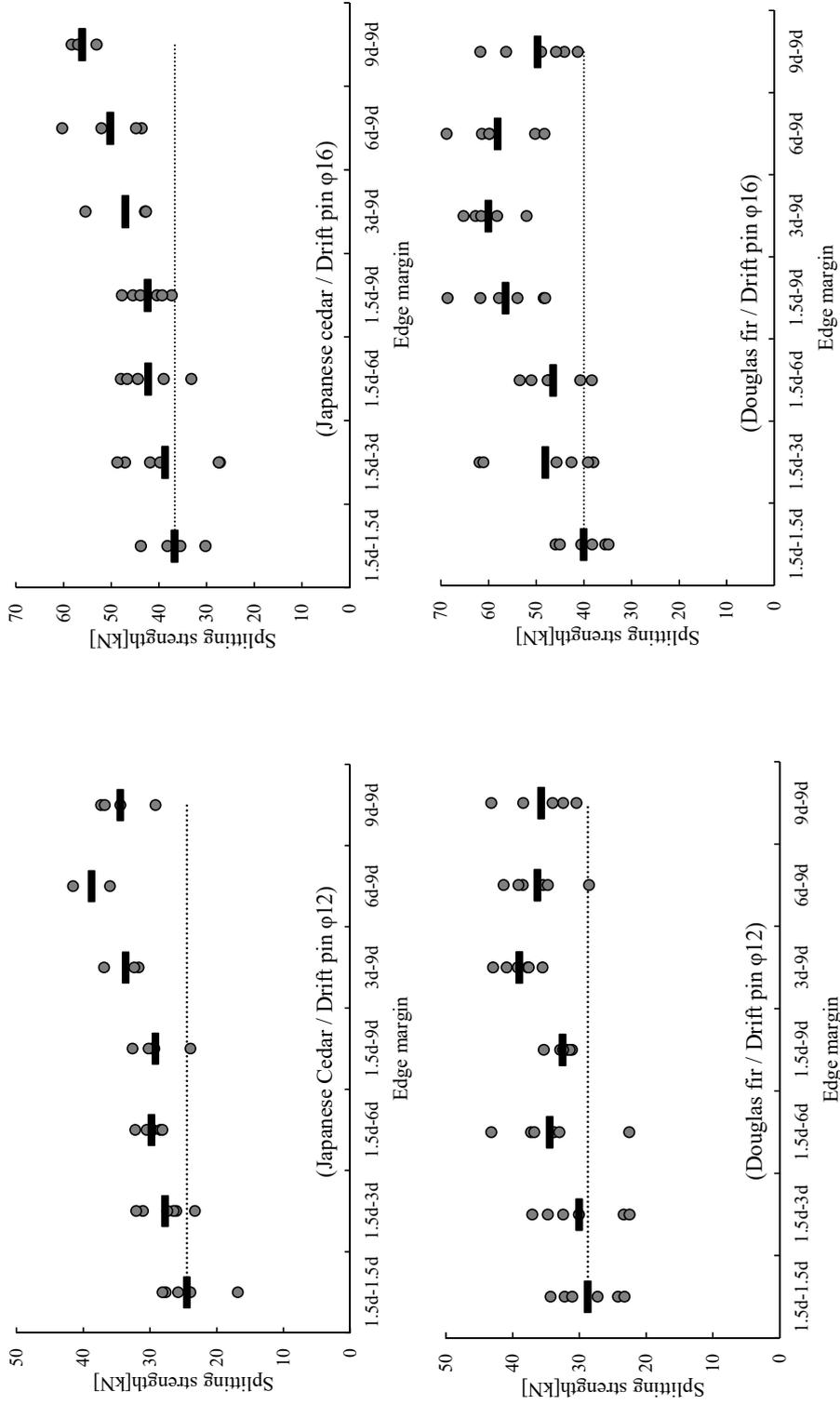


Fig. 4.6 Relationships between splitting strength and edge margin.

Legend: ●: Experimental value, — Average value, Minimum value of average splitting strength.

Note: d: Diameter of drift pin. Edge margins are expressed multiple of diameter of drift pin.

4.4.5. 材厚による影響

材厚と割裂強度の関係を樹種・ドリフトピン径ごとに整理した結果を Fig. 4.7 に示す。Fig. 4.7 は材厚が 30mm の Q, R, S、60mm の T, U, V、90mm の W, X, Y、120mm の A, D, G を比較している。これらの試験体は材厚以外の条件が、端距離が全て 7d、縁距離がそれぞれ 1.5d-1.5d、1.5d-9d、9d-9d という条件になっている。いずれの試験体も主な破壊性状が割裂破壊となった試験体である。

樹種やドリフトピン径に関わらず、材厚が厚くなると、ドリフトピンの母材に対する支圧面が増加するため、平均的には割裂耐力は厚さとほぼ線形比例で上昇する。

しかし、縁距離が 1.5d-1.5d のように短い試験体は材厚が 90mm 以上では耐力上昇が少なくなる傾向が見られ、支圧面と比例関係にはならなかった。

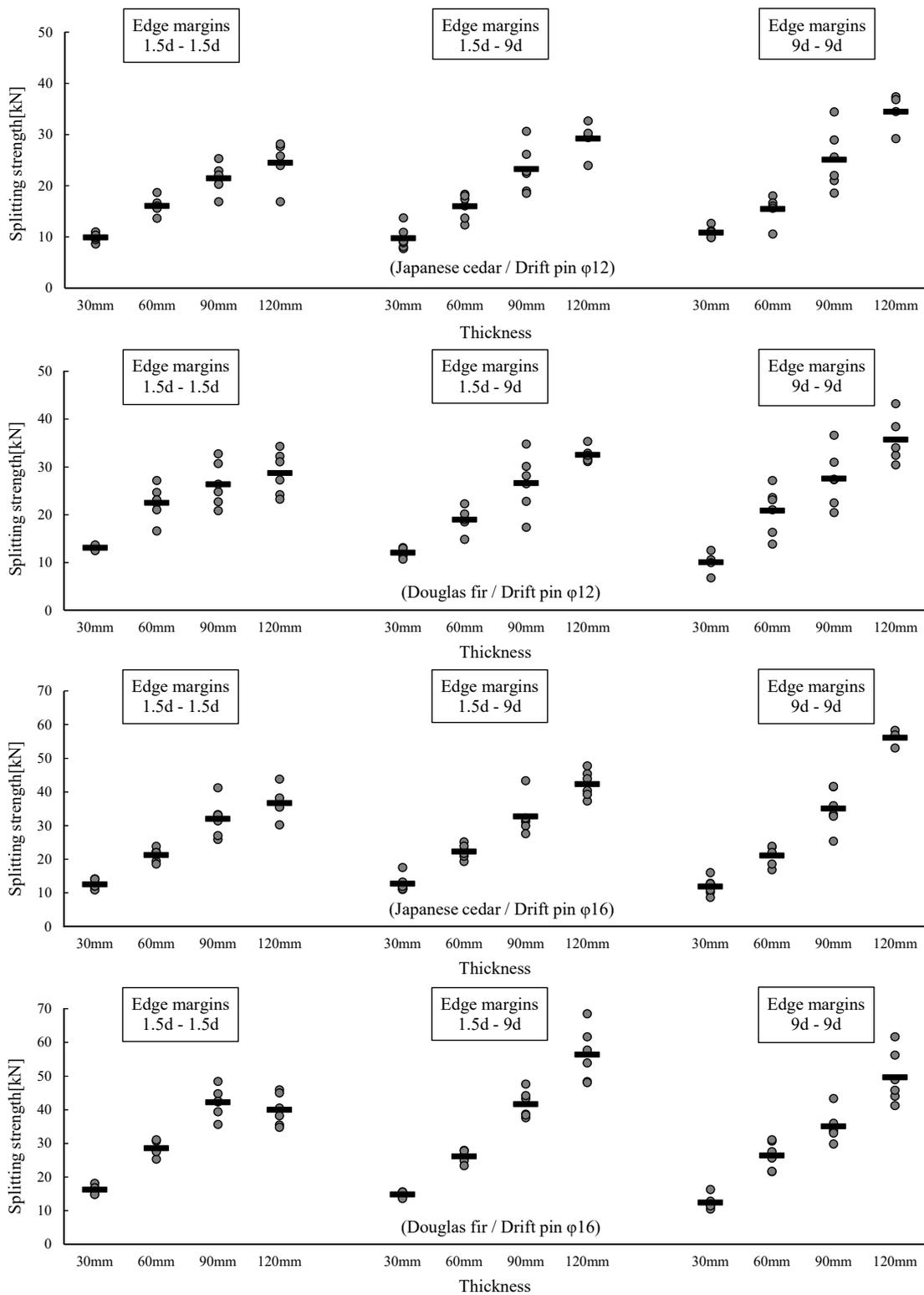


Fig. 4.7 Relationships between splitting strength and thickness.

Legend: ●: Experimental value, —: Average value.

Note: d: Diameter of drift pin. Edge margins are expressed multiple of diameter of drift pin.

4.5. まとめ

スギ・カラマツの製材を用いた縦割裂試験を実施し、樹種・接合具径・端距離・縁距離・材厚が、割裂破壊やせん断破壊を起こす時の終局耐力へ与える影響について考察を行った。本試験によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 破壊性状について、端距離が $4d$ 以下であれば、概ねせん断破壊となり、 $7d$ 以上で割裂破壊になった。端距離が $4d \sim 7d$ の間でモードが移行すると考えられる。また、ドリフトピンの曲げ変形が小さい場合は、試験体全厚で一気にき裂が進展し(Full width splitting)、大きい場合には母材端部に発生したき裂が徐々に進展し全厚に広がる様子(Partial width splitting)が観察できた。
- 2) 樹種について、ベイマツの割裂耐力はスギの約 1.19 倍となり、3 章で測定した割裂破壊定数 C_7 の樹種による比率 1.22 倍とほぼ等しくなった。一方で、せん断破壊時の耐力は 1.09 倍となり、樹種による差が比較的少なかった。
- 3) 接合具径について、ドリフトピン径が $\phi 16$ の試験体の割裂耐力は $\phi 12$ の約 1.45 倍となった。これはドリフトピン $\phi 16$ と $\phi 12$ の投影面積の比 1.33 倍よりも大きい結果であった。ただし、ドリフトピンの曲げ変形が小さい材厚 $30 \cdot 60\text{mm}$ の試験体に限りみると、 $\phi 16$ に対する $\phi 12$ の比は 1.29 倍となり、純粋な接合具の投影面積の比に近い値になった。
- 4) 端距離について、短い場合はせん断破壊を起こし、長くなるにつれ割裂破壊に移行した。その境界は、 $4d \sim 7d$ の間であると推測できた。耐力は端距離が短い範囲ではせん断面積に比例して高くなるが、割裂破壊に完全に移行する $7d$ 以上では耐力の上昇がなくなり、概ね一定値となった。
- 5) 縁距離について、材厚が小さい試験体では縁距離が割裂耐力に与える影響はほとんどなかったが、材厚が十分に厚い試験体では縁距離が長くなることによって、縁距離が小さい試験体と比べ、耐力が 1~2 割上昇した。
- 6) 材厚について、樹種・接合具径に関わらず、厚くなるにつれ、概ね線形比例で耐力が上昇した。ただし、縁距離が短い試験体は材厚が確保できていても割裂耐力が低くなり、材厚と線形比例にはならなかった。

5. 支圧応力度による縦割裂耐力推定手法の提案

5.1. 目的

木材が繊維方向に荷重を負担した際に起きる割裂破壊について、そのメカニズムは明らかになっておらず、耐力を推定する方法はない。縦割裂耐力推定式を提案することは急務であるが、一体どのような応力に対して割裂破壊が発生するのか、ということを明確にする必要がある。

そこで本試験の結果より、ドリフトピン接合部における割裂破壊はドリフトピンが母材に与える支圧応力度がある一定の値に達した場合に起きるものだと考えた。また、桑村の研究¹⁾⁶⁾でも割裂破壊の発生はある一定の応力度に達した時点で起こるということは検証されている。

ドリフトピンが母材に与える支圧応力度は Fig. 5.1 のように考えられ、接合具の曲げ降伏・母材の支圧降伏・ドリフトピン端部の回転拘束を考慮すると手計算レベルでは予測することは難しい。そのため、解析プログラムで適切にモデル化を行い、支圧応力度の分布を推定する。

そして、その結果を基に縦割裂メカニズムを明らかにし、耐力推定法を提案することを目的としている。

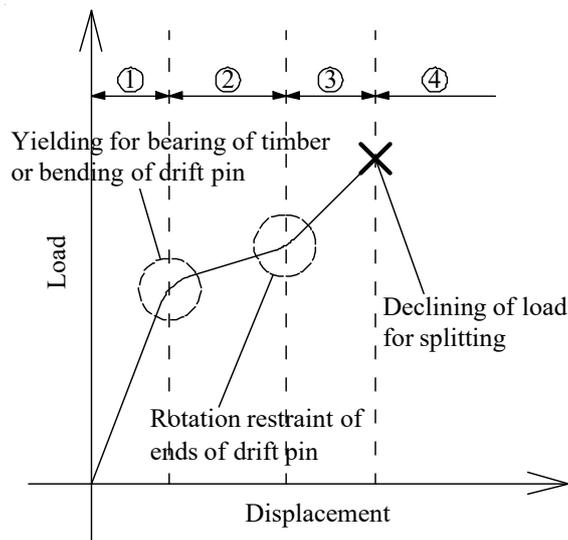


Fig. 5.1 Structural mechanism of the drift pinned joint with steel side plates.

Note: ①: Elastic behavior by bearing force, ②: Secondary stiffness for yielding, ③: Load rising by rotation restraint, ④: Load declining by failure.

5.2. 縦割裂試験の解析

本節では解析結果で得られたドリフトピンが母材に与える支圧応力度(接合部に加わるせん断力を接合具の投影面積で除した数値)に特に注目して考察を行っており、モーメント図・せん断力図・反力図・変位図の記載を省略している。これらはまとめて、別添する付録 B)にまとめて示す。

5.2.1. 解析モデル

縦割裂試験における荷重変位関係は 4 章の再掲になるが、蒲池らの研究⁷⁾により Fig. 5.1 のように考えられる。

この荷重変位関係を基に、縦割裂試験の母材上に載るドリフトピンを弾塑性床上の弾塑性梁としてモデル化し、応力解析プログラム((株)構造システム SNAP Ver.7.0.0.8)を用いて解析を行った。そして、割裂破壊発生時のドリフトピンが母材に与える支圧応力度分布を算出した。解析モデルを Fig. 5.2 は示した。実験で、ドリフトピン端の回転拘束が生じなかった材厚 30・60mm の試験体は回転拘束なしのモデル、回転拘束による荷重上昇が生じた材厚 90・120mm の試験体は回転拘束ありのモデルで解析を行った。

母材のめり込み剛性及び支圧強度は材厚 30mm の試験体(試験体 Q, R, S)の縦割裂試験の結果から算出し、その平均値とした。材厚 30mm の試験体ではドリフトピンから母材への支圧応力伝達がほぼ均等であり、純粋な支圧強度試験に近いためである。その時の支圧強度はスギでは約 26.81N/mm²、ベイマツでは約 34.97N/mm²であった。また、繊維方向の支圧強度試験では荷重変位関係が完全弾塑性に近くなることが知られており⁸⁾、そのため、これら特性値を用い、完全弾塑性モデルとしてモデル化を行っている。また木材のヤング率は試験終了後の試験体から断面寸法が 20~30mm 角、長さが 300mm 程度の小試験体を切り出し、スパン 250mm で三点曲げ試験を行うことで計測した。これらの方法で測定を行った木材の諸元をまとめて Table 5.1 に示した。

ドリフトピンは本試験で用いたものと同様のものを用い、いずれの径についてもスパン 125mm で中央集中荷重の三点曲げ試験を行って、ヤング率・曲げによる第 1 降伏耐力・第 2 降伏耐力・初期剛性に対する二次剛性の割合を算出した。ただし、ドリフトピンのヤング率は公称値($2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)とほぼ同値となったため、それを採用している。ドリフトピンの曲げ剛性は鋼材のヤング率に断面二次モーメントを乗じたものとしている。これらの方法で測定を行った鋼材の諸元をまとめて Table 5.2 に示した。

材端の回転拘束は上記の通り、材厚 30・60mm の試験体では、回転拘束を自由とし、材厚 90・120mm の試験体では、回転拘束を固定とした。材端を回転拘束する場合の回転剛性は剛とし、第 2 降伏耐力に達した時点で完全に降伏するものとした。

モデルに加える荷重は、4 章の縦割裂試験での試験体 A・Q・T・W(縁距離が両側 1.5d、端距離が 7d、材厚がそれぞれ 120・30・60・90 の試験体である。)それぞれの最大荷重の平均値とした。加力位置は側材の鋼板の位置を想定し、モデルの材端とした。モデルに加えた荷重を Table 5.3 に示した。

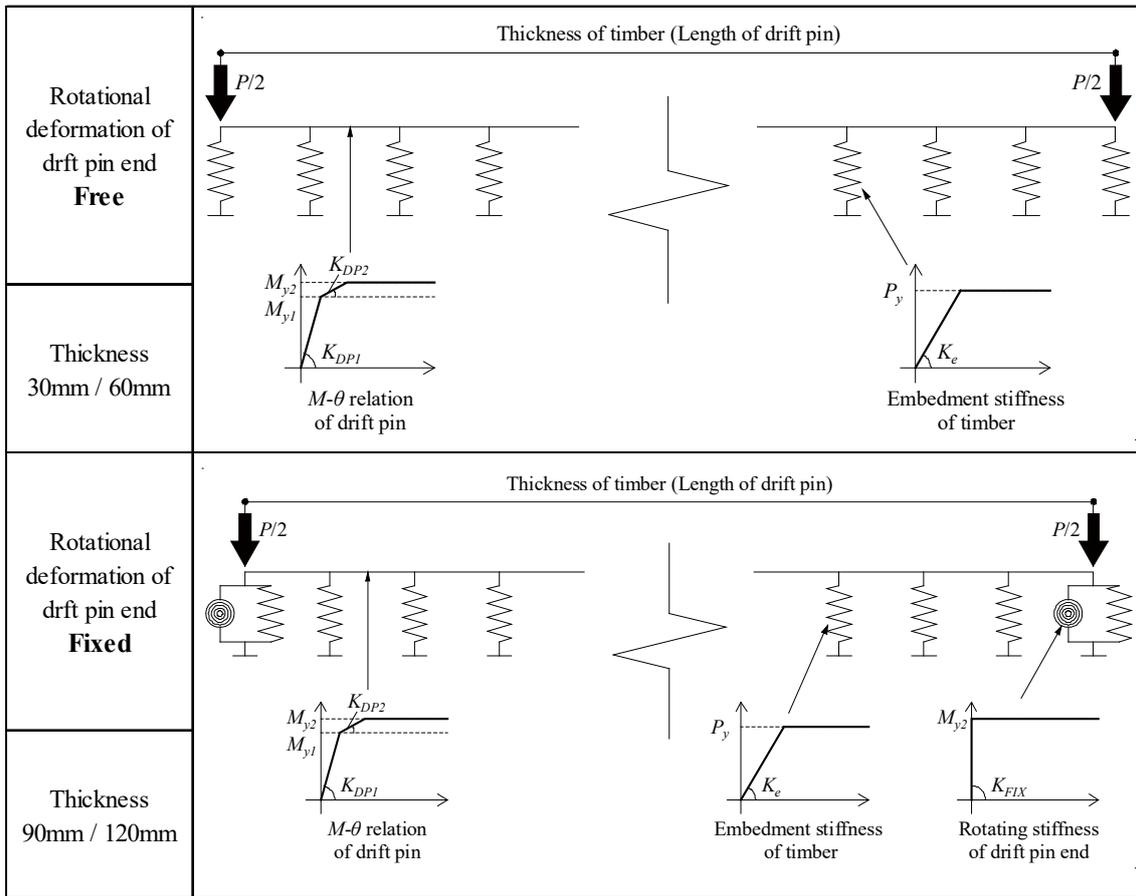


Fig. 5.2 Analysis model of splitting tests.

Note: P : Load.

[Parameter of timber] P_y : Yield embedment strength, K_e : Embedment stiffness.

[Parameter of drift pin] M_{y1} : 1st yield moment, M_{y2} : 2nd yield moment, K_{DP1} : Initial stiffness,

K_{DP2} : Secondary stiffness, K_{FIX} : Rigid joint (Fixed).

Table 5.1 Characteristic value of timber.

Wood species	Diameter of drift pin d (mm)	Young's modulus E (N/mm ²)	Embedment stiffness per unit area K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength per unit length P_y (N/mm)
Japanese cedar	12	4818	587.3	329.8
	16			418.1
Douglas fir	12	7238	910.7	432.8
	16			542.0

Table 5.2 Characteristic value of drift pin.

Drift pin	Diameter of drift pin d (mm)	Young's modulus E (N/mm ²)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
SS400	12	205000	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$
	16		360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

Table 5.3 Experimental value of splitting load.

Wood species	Diameter of drift pin d (mm)	Thickness t (mm)	Load at splitting P (kN)	Wood species	Diameter of drift pin d (mm)	Thickness t (mm)	Load at splitting P (kN)
Japanese cedar	12	30	9.89	Douglas fir	12	30	12.99
		60	16.04			60	22.48
		90	21.43			90	26.36
		120	24.57			120	28.71
	16	30	12.54		16	30	16.26
		60	21.24			60	28.22
		90	32.00			90	42.19
		120	35.71			120	39.99

5.2.2. 解析結果

弾塑性フレーム解析の結果を Fig. 5.4~5.7 に示す。Fig. 5.4~5.7 のグラフは Fig. 5.3 に示すように、試験体(ドリフトピン)中央部を原点とし、そこから、任意の距離(x mm)離れた箇所の割裂破壊発生時の支圧応力度を示したものとなっている。これらの結果より、材厚 30mm の試験体ではいずれのタイプであっても、実験における割裂破壊発生時の接合具が母材に与える支圧応力度が、ほぼ均等に伝達されるが、それ以上の材厚の試験体では、支圧応力度のラグが生じ、加力部に近い母材端部で最大となり、母材中央部で最小となる分布になった。支圧応力度のラグはドリフトピンの曲げ変形によって生じると考えられ、曲げ剛性の低い $\phi 12$ のドリフトピンを使用した試験体ではラグが大きく、 $\phi 16$ では小さかった。さらに母材のめり込み剛性が高いベイマツではラグが大きく、低いスギでは小さかった。

本解析結果において、割裂破壊を起こし荷重が低下するのは、いずれの試験体においても概ね支圧応力度の最大値が支圧強度に達した瞬間であることがわかった。

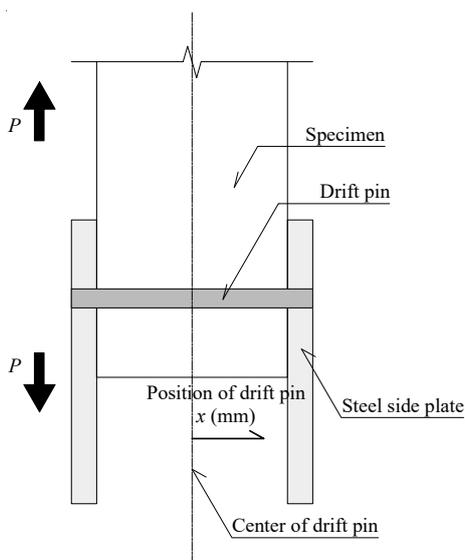


Fig. 5.3 Explanation of “Position of drift pin”.

Note: “Position of drift pin” is the distance from center of drift pin.

$x = 0$: Center of drift pin.

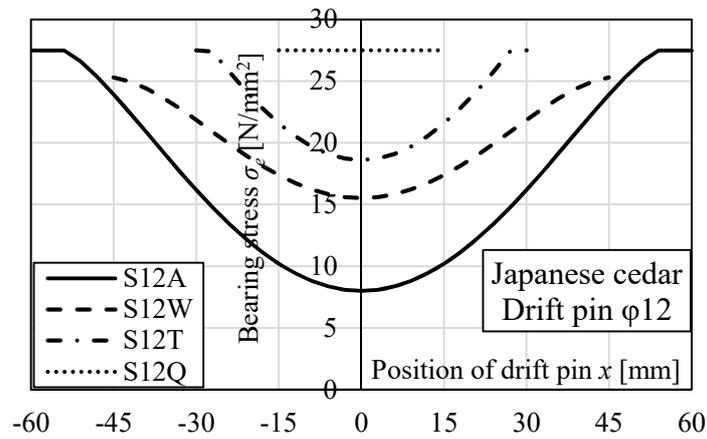


Fig. 5.4 Bearing stress by drift pin to timber. (Wood species: Japanese cedar, Drift pin $\phi 12$)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

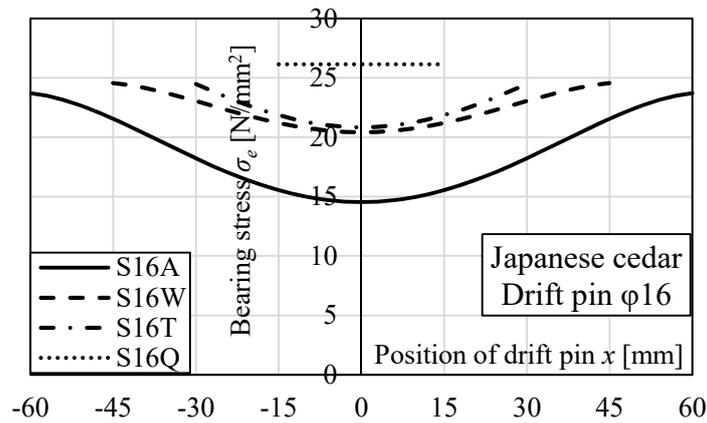


Fig. 5.5 Bearing stress by drift pin to timber. (Wood species: Japanese cedar, Drift pin $\phi 16$)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

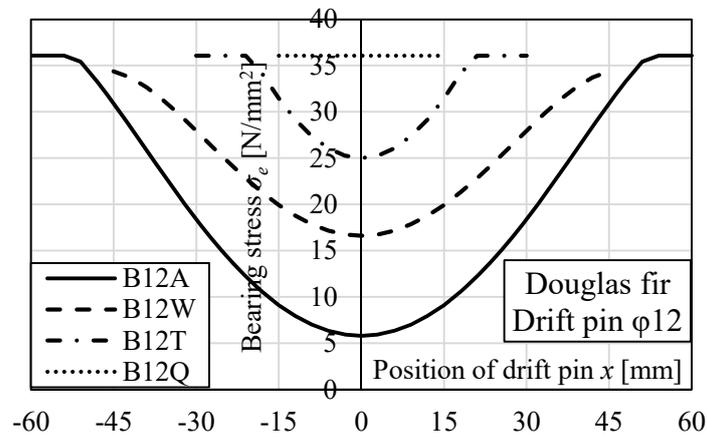


Fig. 5.6 Bearing stress by drift pin to timber. (Wood species: Douglas fir, Drift pin $\phi 12$)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

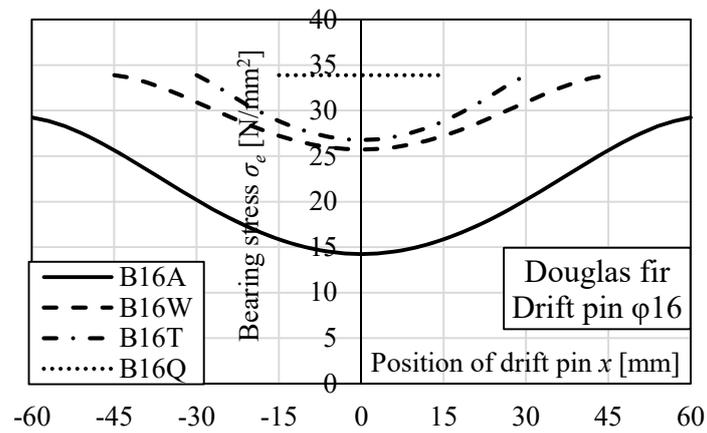


Fig. 5.7 Bearing stress by drift pin to timber. (Wood species: Douglas fir, Drift pin $\phi 16$)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

5.3. 解析結果と割裂発生メカニズムの提案

まず、4章の実験結果より観察される縦割裂破壊による荷重低下現象を説明する。また、最初は割裂現象を簡単に考えるため、木材の材厚が十分に薄いものとして考え、平面応力状態を仮定して、説明する。

①木材の繊維方向に荷重を加えると、②ある荷重レベルに達した時点で割裂破壊が生じる。③その後、割裂によって分断された両側縁が曲げ変形を起こして、接合具直下の割裂面から木材が開き始める。④その開きにより接合具が徐々に支持できなくなり、いずれ荷重が低下する。すなわち、メカニズムは Fig. 5.8 のように推移すると考えられる。

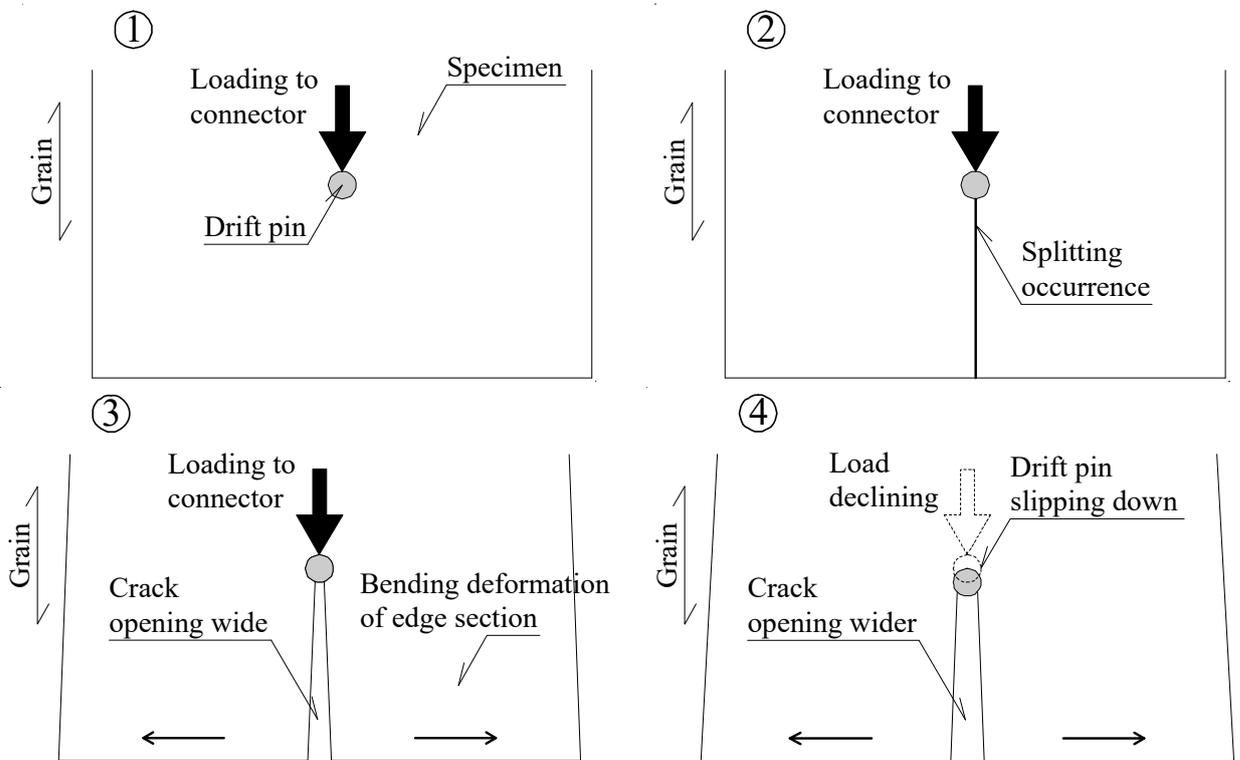


Fig. 5.8 The mechanism of splitting regardless of thickness.

Sawata らによると⁸⁾木材の繊維方向に支圧応力を加えた時のめりこみ変形との関係は、ほぼ完全弾塑性状態で推移すると報告されている。すなわち、支圧応力が支圧強度に達した時点で降伏し以降は荷重値が一定のまま変形を続けるという状態になる。

また、4章の実験より、その支圧強度は Fig. 5.8 の②の状態のような割裂が発生した瞬間の強度であり、その後の変形能力は母材の縁断面の曲げ剛性によって決まることがわかる。つまり、縁距離が不十分な接合部では割裂発生以降、縁断面の変形が大きいため、すぐにドリフトピンが支持できなくなり荷重が低下するが、縁距離が十分に長い接合部では、縁断面での変形が抑えられるため、ドリフトピンが支持され、荷重を保持したまま変形が続く。

以上をまとめると、木材の繊維方向へ支圧応力を加えた時の荷重変形関係は、縁距離の長短によって、Fig. 5.9 のように考えられる。

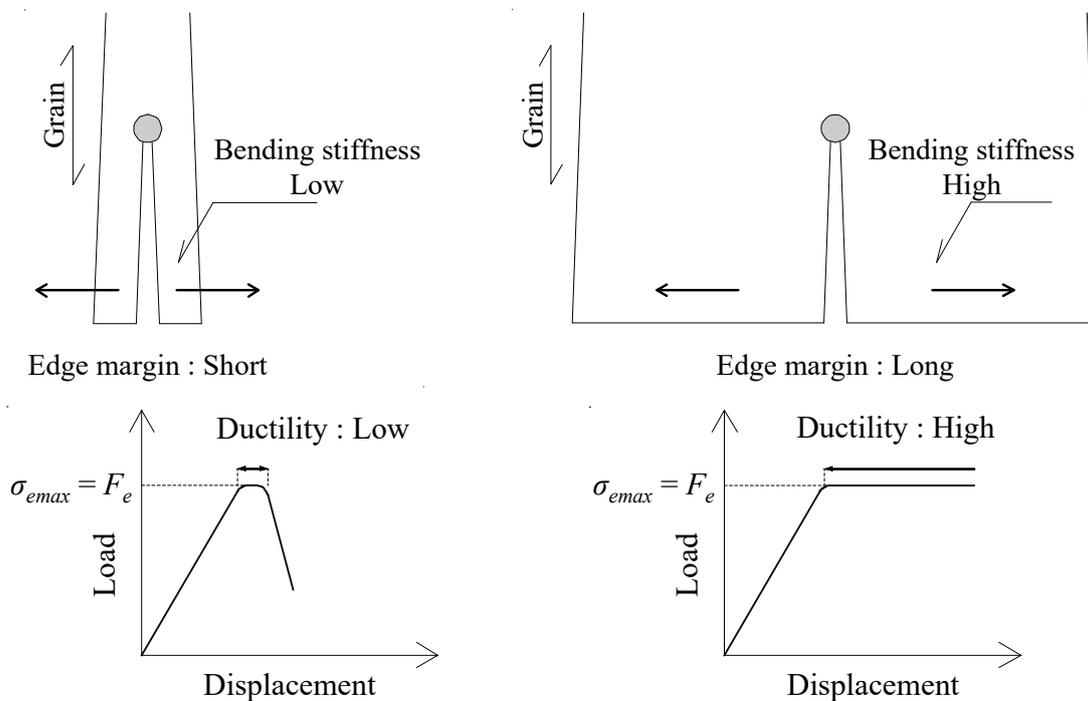


Fig. 5.9 Behavior after splitting by differences of edge margins.

Note: σ_{emax} : Maximum embedment stress, F_e : Embedment strength

Fig. 5.8、5.9 の破壊性状は材厚を無視しているため、接合具を剛体と見なしているが、実際には母材が材厚を持つため、接合具が曲げ変形を生じながら、母材に支圧応力を与えていくことになる。そのため、支圧応力度の分布にラグが生じ、Fig. 5.10、5.11 のように、変形が推移していくと考えられる。

Fig. 5.10 は、荷重の増加による支圧応力度の推移を図にして表したものである。また、Fig. 5.11 はその様子を模式的に示した図である。材厚が厚い接合部では支圧応力度のラグが生じ、加力点に近い材端で高く、離れた中央部で低くなる。それゆえ、最初に支圧応力度の最大値が支圧強度に達する材端から、割裂の起点となる初期き裂が発生し、き裂の進展とともに試験体中央部での支圧応力度も徐々に上昇していく。そして、接合部の全厚に渡って支圧応力度が支圧強度に達する(この状態を、全塑性状態と呼ぶことにする)と破壊を起こすというメカニズムで縦割裂が発生している。

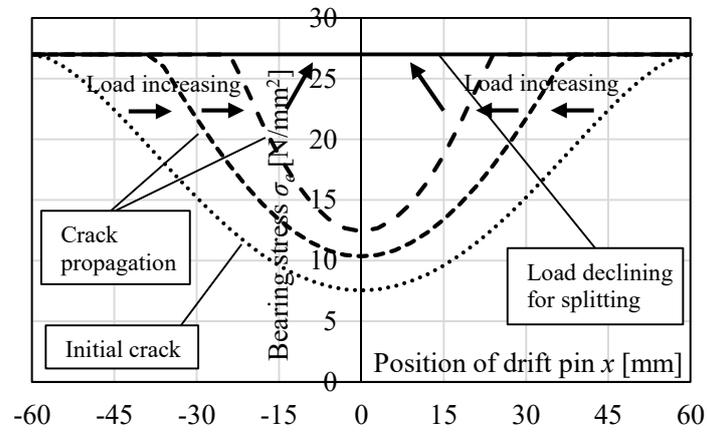


Fig. 5.10 Transfer in bearing stress with crack propagation.(Edge margin: Long)
 Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

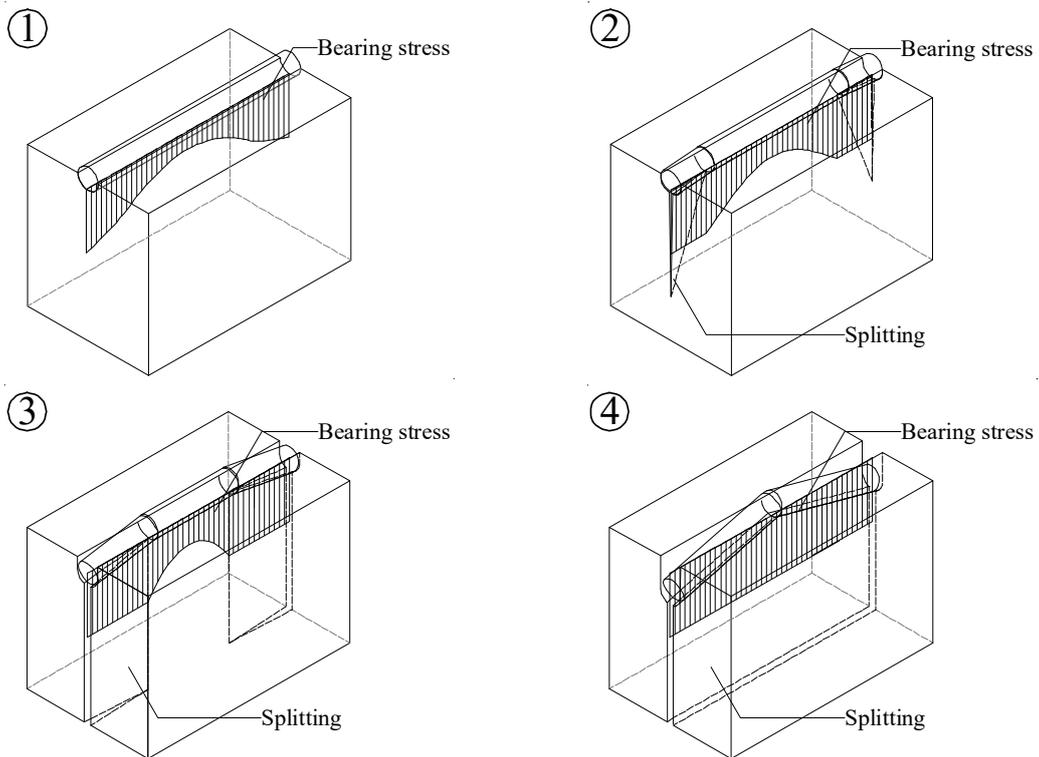


Fig. 5.11 Isometric image of transfer in bearing stress with crack propagation. (Edge margin: Long)

Fig. 5.10、Fig. 5.11 で示したメカニズムは縁距離が十分に長く、塑性変形性能が高い場合のメカニズムであり、逆に縁距離が短く塑性変形性能が乏しい場合は、Fig. 5.12、Fig. 5.13 のような荷重の増加による支圧応力度の推移が見られる。まず、支圧応力度が最大となる材端で支圧強度に達し、変形性能が乏しいためすぐに破壊に至り荷重が低下する。そこで損失する応力が母材の内部のまだ破壊していない箇所へ再分配され、支圧応力度が上昇し、支圧強度に達した箇所でも破壊が生じる。このように材端からの割裂進展に伴う局所的な破壊と応力の再分配のサイクルが生じ、接合部全体としても、比較的耐力が低く塑性変形性能に乏しい荷重変形特性となる。

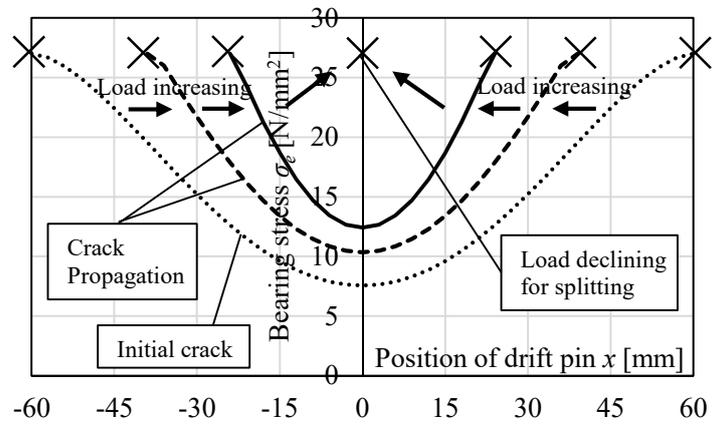


Fig. 5.12 Transfer in bearing stress with crack propagation.(Edge margin: Short)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

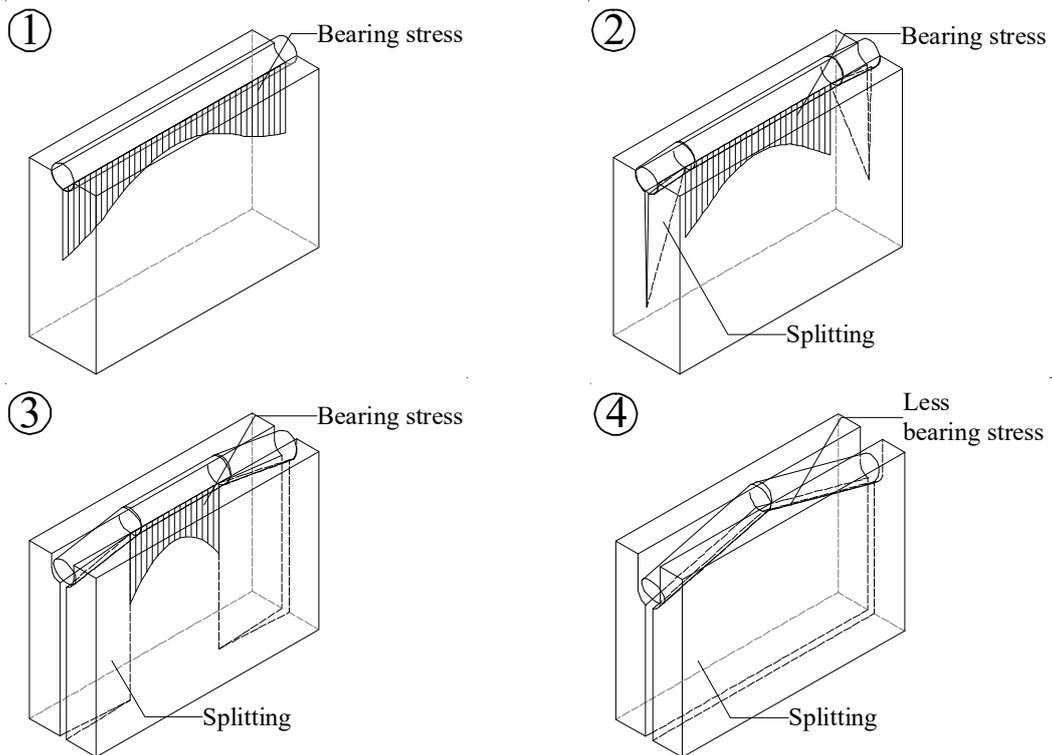


Fig. 5.13 Isometric image of transfer in bearing stress with crack propagation. (Edge margin: Short)

実際の試験結果では、縁距離が最も短い接合具の両側の縁距離が $1.5d-1.5d$ である試験体では、後者の縁距離が短い場合の破壊性状に近くなるが、それよりも縁距離が長くなるにつれ、前者の縁距離が十分に長い場合と後者の縁距離が短い場合の中間の破壊性状になっていると考えられた。つまり、Fig. 5.14、5.15 のように、材端の最大支圧応力度が支圧強度に達した後、荷重を保持しながらしばらくは変形するが、全塑性状態に達する前に材端から局所的な破壊を起こし荷重が低下する。それ以降は応力の再分配と材端からの割裂進展に伴う局所的な破壊が繰り返され、荷重が低下していると考えられた。

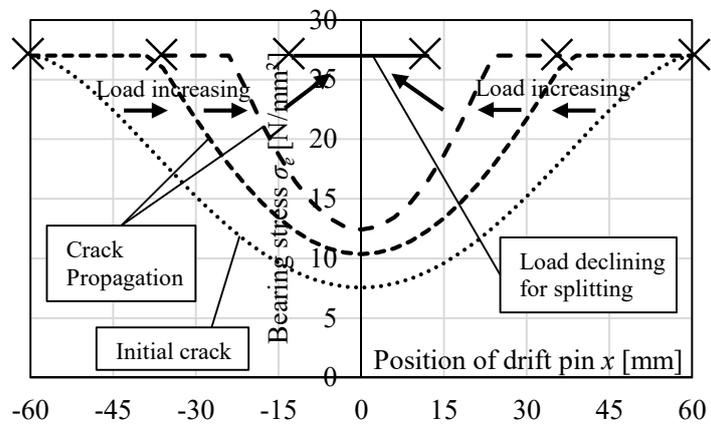


Fig. 5.14 Transfer in bearing stress with crack propagation. (Test result)

Note: Position of drift pin: See Fig. 5.3

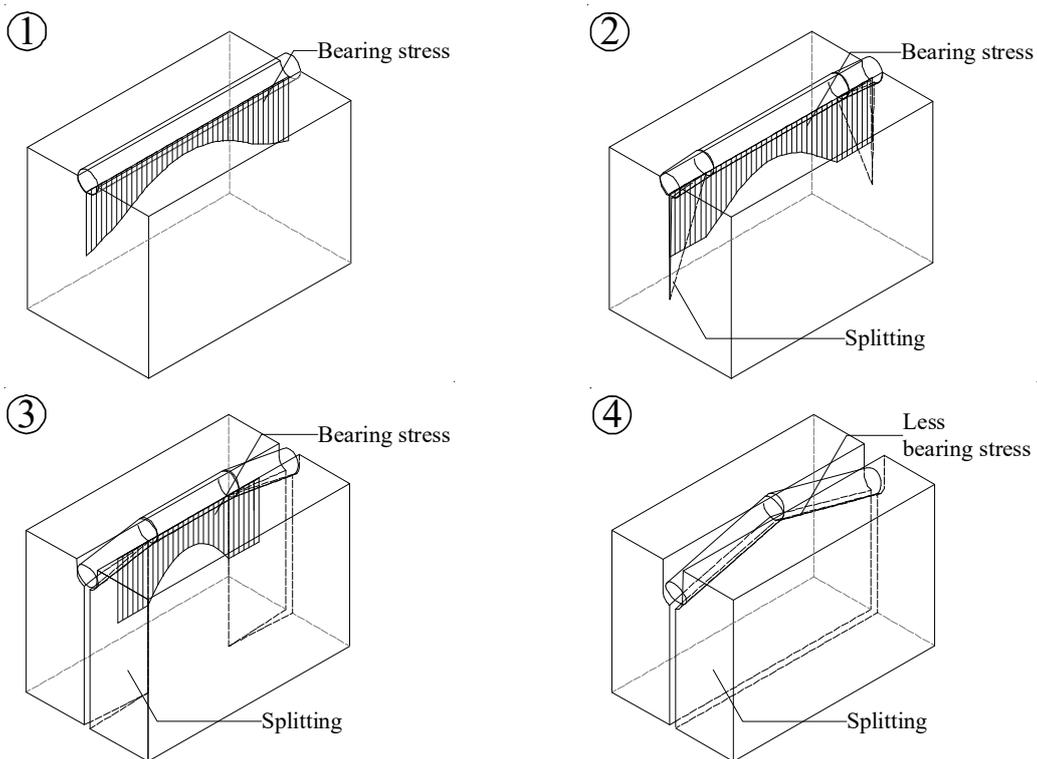


Fig. 5.15 Isometric image of transfer in bearing stress with crack propagation. (Test result)

またこのメカニズムの考え方によって、4章の縦割裂試験で観察できた現象に対しても、矛盾なく説明することができる。

現象①: 接合具径について、ドリフトピン径が $\phi 16$ の試験体の割裂耐力は $\phi 12$ の約 1.45 倍となった。これはドリフトピン $\phi 16$ と $\phi 12$ の投影面積の比 1.33 倍よりも大きい結果であった。ただし、ドリフトピンの曲げ変形が小さい材厚 30・60mm の試験体に限り、 $\phi 16$ に対する $\phi 12$ の比は 1.29 倍となり、純粋な接合具の投影面積の比に近い値になった。

→ドリフトピン $\phi 12$ は $\phi 16$ に比べて、曲げ剛性が低く、接合具の曲げ変形が大きいため、支圧応力度のラグが生じやすい。そのため、 $\phi 12$ では接合部端部に応力が集中し、最大支圧応力度が大きくなる。一方で、 $\phi 16$ は曲げ剛性が高く、接合具の曲げ変形が小さいため、比較的ラグが少なくなる。そのため、接合部端部の支圧応力度の集中が $\phi 12$ ほどではない。母材の材厚が大きい場合、接合具の曲げ変形による支圧応力度のラグが顕著になる。すなわち、材厚が薄い場合は接合具の曲げ変形が小さいため、ドリフトピンの径による耐力の差が小さいものの、厚い場合は接合具の曲げ変形が大きいため、径による耐力の差が大きくなる。この理由により、ドリフトピン径による割裂耐力の差は材厚が厚い場合では比較的大きく、材厚が薄い場合では投影面積の比に近くなったと考えられる。

現象②: 破壊性状について、～中略～ ドリフトピンの曲げ変形が小さい場合は、試験体全厚で一気にき裂が進展し (Full width splitting)、大きい場合には母材端部に発生したき裂が徐々に進展し全厚に広がる様子 (Partial width splitting) が観察できた。

→母材の材厚が厚く、ドリフトピン径が細い試験体では接合具の曲げ変形が大きいため、支圧応力度のラグが大きく、材端の支圧応力度が支圧強度に達した時点からき裂が発生するが、その時点ではまだ支圧応力度が低い母材の中央部では支圧強度に達していない。その後、き裂の進展とともに母材中央部でも支圧応力度が上昇して支圧強度に達し、割裂が伝播する。それによって割裂が母材の全厚に渡ってつながる。Partial width splitting はこのようなメカニズムで起こっていると説明できる。

一方で、Full width splitting は、材厚が薄くドリフトピン径が太い試験体でよく見られる。このような試験体は支圧応力度のラグが少なく、母材端部の支圧応力度が支圧強度に達した時点で、母材中央部の支圧応力度もほぼ支圧強度に達している。そのことにより、母材全厚の支圧応力度が支圧強度に達する速度が速いため、割裂が全厚に渡って一気に起こり荷重が低下するという現象であると説明できる。

これらの様子をまとめて、Fig. 5.16 に示す。

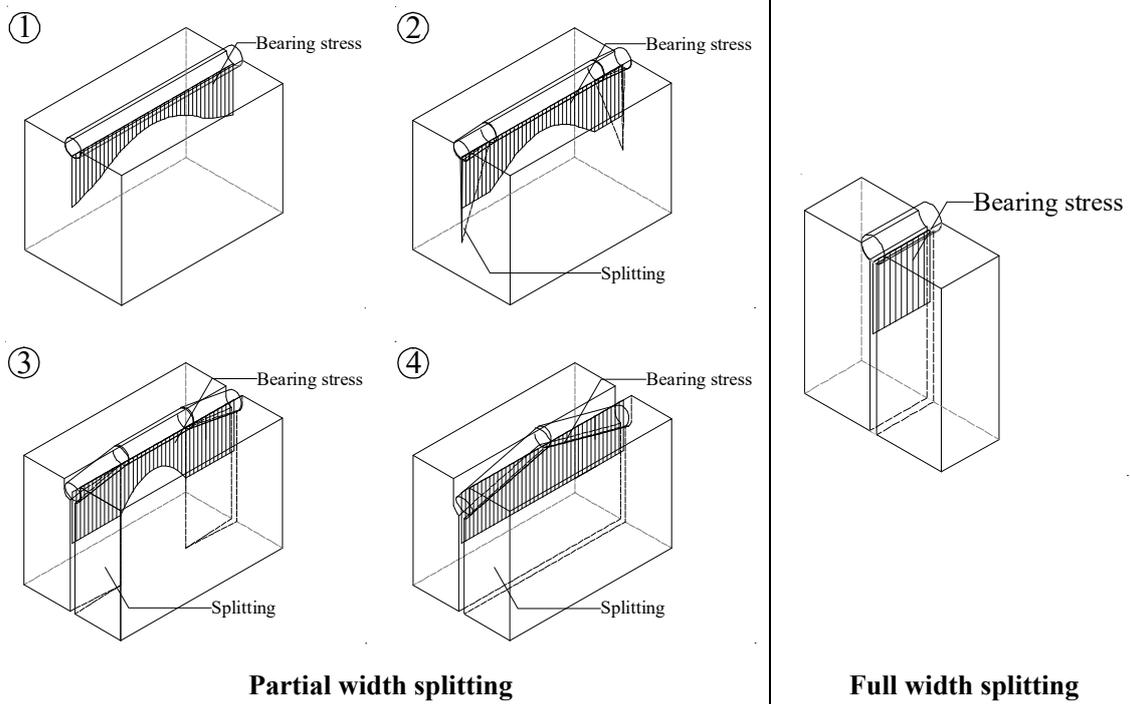


Fig. 5.16 Isometric image of “Partial width splitting” and “Full width splitting”.

現象③：縁距離について、材厚が小さい試験体では縁距離が割裂耐力に与える影響はほとんどなかったが、材厚が十分に厚い試験体では縁距離が長くなることによって、縁距離が小さい試験体と比べ、耐力が1~2割上昇した。

現象④：材厚について、樹種・接合具径に関わらず、厚くなるにつれ、概ね線形比例で耐力が上昇した。ただし、縁距離が短い試験体は材厚が確保できていても割裂耐力が低くなり、材厚と線形比例にはならなかった。

→縁距離の短い試験体では割裂発生後の割裂線によって分断された縁断面の曲げ剛性が低く、母材の開きが抑えられないため、割裂発生以降のドリフトピンの支持がほとんどできず、塑性変形性能が乏しい。一方で、縁距離の長い試験体では、割裂発生後の縁断面の曲げ剛性が高く、母材がほとんど開かないため、割裂発生以降もドリフトピンが支持されて荷重が低下しない。そのため比較的長い塑性域を持つ割裂破壊となる。これらは Fig. 5.9 に説明した通りである。

縁距離が短い試験体で材厚が十分に厚い場合は、最大支圧応力度が支圧強度に達する接合部の端部から局所的な破壊を起こしてドリフトピンが支持できずに荷重が低下し、残った支圧面で応力の再分配と局所的な破壊が繰り返されるため、接合部全体としても荷重が上昇せず、塑性域も短い。縁距離が長い試験体で材厚が十分に厚い場合は、最大支圧応力度が支圧強度に達してもすぐには破壊に至らず、ドリフトピンが支持できるため、荷重が低下しない。それによって、荷重を保持したまま変形が進むため、接合部全体として荷重が上昇し、比較的長い塑性域を持つ。これらの理由が、縁距離が十分にあり、材厚が十分に厚い試験体が、そうでない試験体に比べて耐力の上昇が見られる原因となっていると考えられる。一方で、材厚が薄い試験体では接合具が支持できる領域が少なく荷重の蓄積が起こりづらいため、縁距離が十分に取れていても荷重の上昇が見られないと考えられる。

また、割裂耐力が材厚と線形比例にならなかったのは、材厚が厚い場合には、ドリフトピンの曲げ変形による支圧応力度のラグが生じるため、また上記のように支圧応力度が高い箇所から割裂破壊が発生するためであり、単純にドリフトピンから支圧応力度を均等に伝達する場合のような比例関係にならないからだと考えられる。これらをまとめて、Fig.5.17~5.18 に示す。

以上より、提案した縦割裂破壊メカニズムで、実験で観察した現象を矛盾なく説明できる。そのため、提案したメカニズムが妥当であると考え、これを基に割裂耐力推定法を提案する。

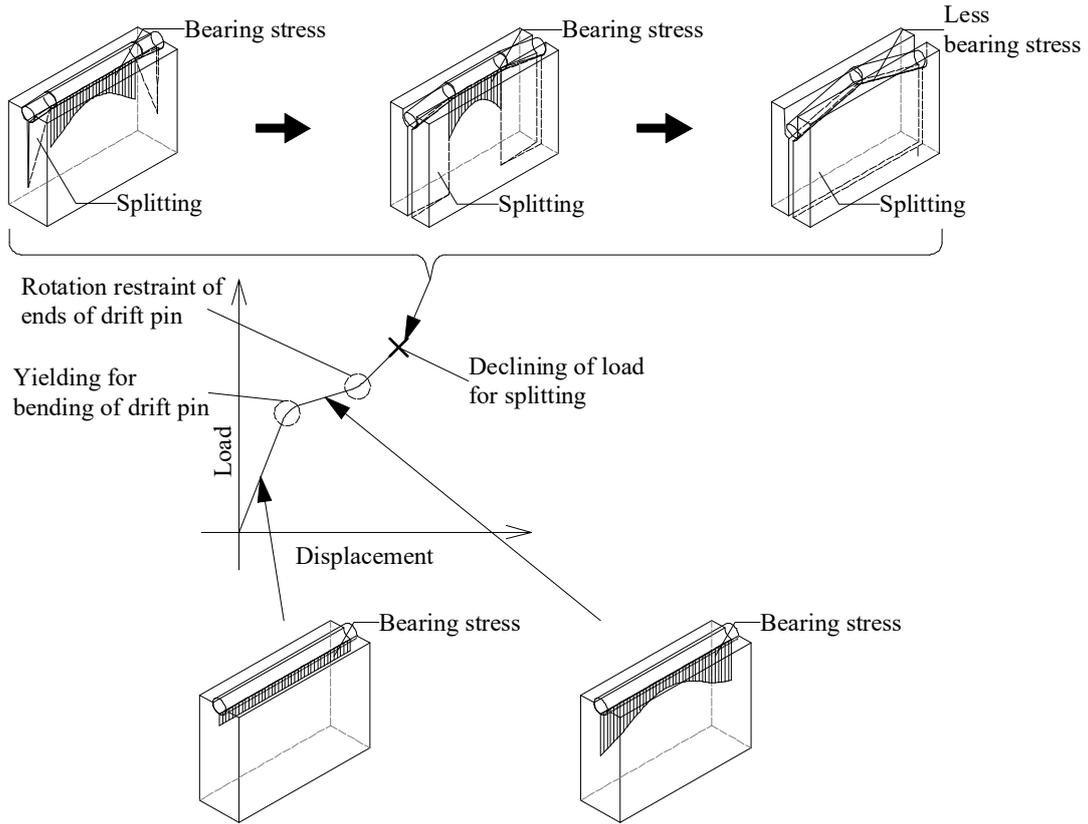


Fig. 5.17 Splitting load with differences of edge margin. (Edge margin: short)

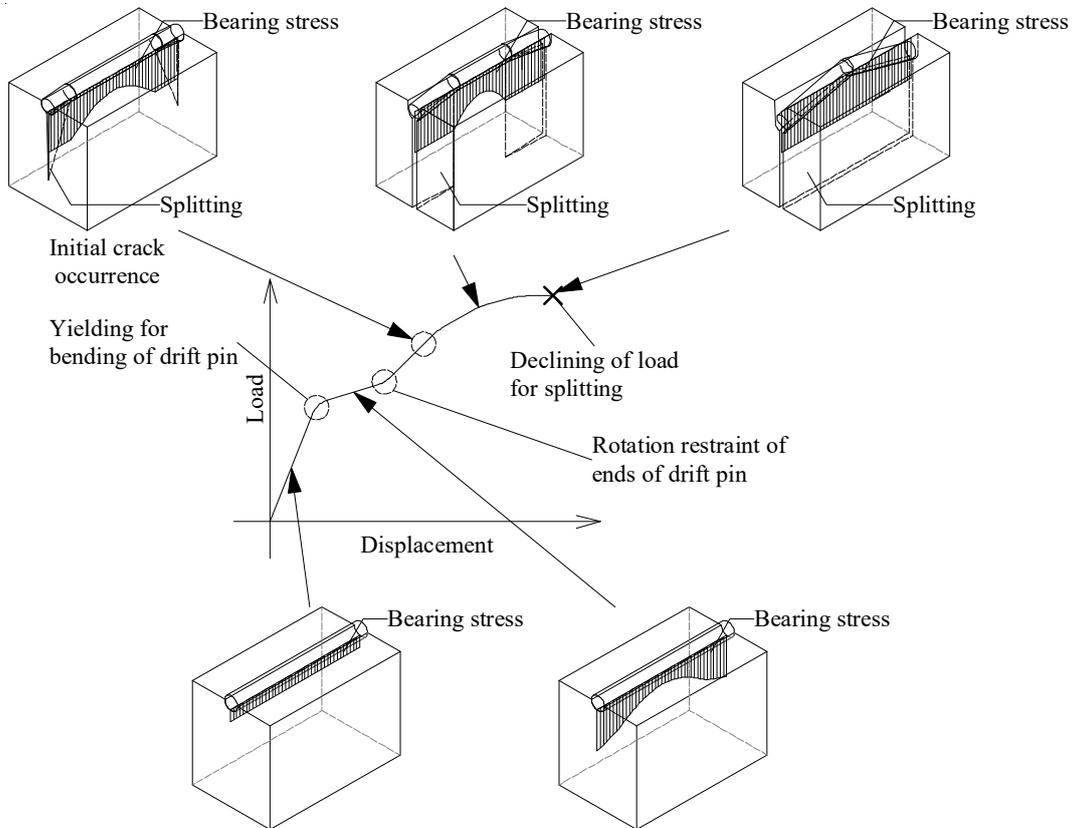


Fig. 5.18 Splitting load with differences of edge margin. (Edge margin: Long)

5.4. 縦割裂耐力推定手法の提案

本節で推定する縦割裂耐力は、初期き裂が入った時点での耐力とする。すなわち Fig. 5.19 に示す初期き裂が発生する時点(Initial crack occurrence)としている。前節のメカニズムを考えた場合、接合部が塑性変形を続けると、荷重が上昇するが、割裂破壊の終局までの変形性能は正確に評価することは難しいため、一体どの程度荷重が上昇するのか、ということ予測することは難しい。また、このように考えた場合、厳密さには欠けるが安全側の評価となるという利点もある。

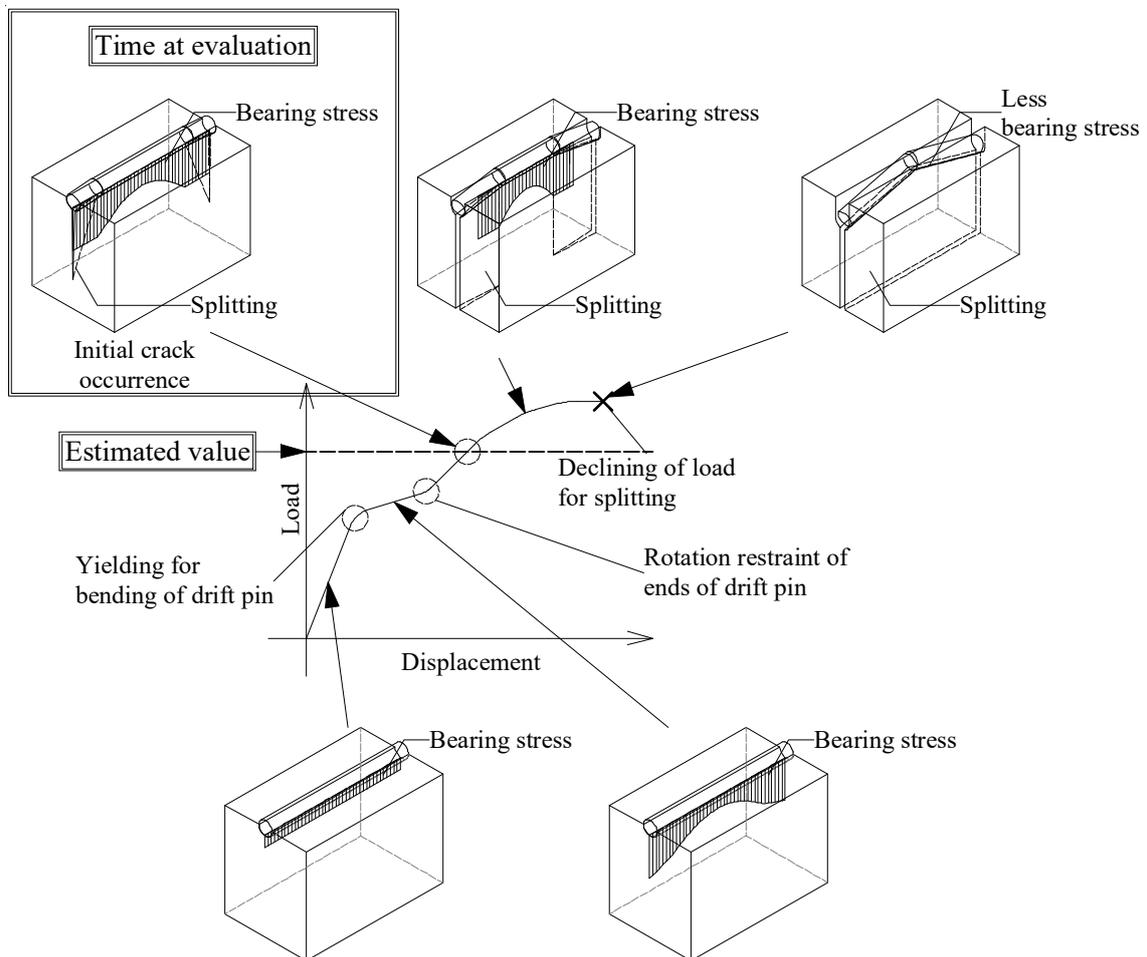


Fig. 5.19 Time at evaluation.

5.4.1. 簡易計算式による縦割裂耐力推定

5.3 節で提案したメカニズムを基に考えると、縦割裂の発生条件は

$$\sigma_{emax} = F_e \quad (5.1)$$

ここで、 σ_{emax} : 支圧応力度の最大値(N/mm²)、 F_e : 基準支圧強度(N/mm²)

基準支圧強度は、木質構造設計規準・同解説⁹⁾より(5.2)式で表される。

$$F_e = 60.68 \cdot \gamma_0 \quad (5.2)$$

ここで、 γ_0 :木材の基準比重⁹⁾

蒲池らの研究⁷⁾より、鋼板添え板ドリフトピン接合部における、モーメント・せん断力の一般解が導かれており、その式を変形することで、接合部における任意の位置でのドリフトピンが母材に与える支圧応力度の一般解を導くことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_e(x) &= (Q(x) - Q(x-1))/d \\ &= \frac{P}{d} \left(\frac{4\alpha}{t^2} x - \frac{2\alpha}{t^2} - \frac{\alpha-1}{t} \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\alpha = \frac{1}{0.29 + 7.18Ed^3/kt^4}$$

ここで、 P : 割裂耐力(N)、 d : ドリフトピンの直径(mm)、 t : 母材の材厚(mm)、 E : 接合具のヤング係数(N/mm²)、 k : 木材の面圧定数(N/mm³)、 x : 母材中央からの距離(mm)(Fig. 5.3 参照)

支圧応力度は接合部の材端($x = t/2$)で最大となることが明らかなので、

$$\sigma_{emax} = \sigma_e \left(\frac{t}{2} \right) = \frac{P}{d} \left(\frac{\alpha+1}{t} - \frac{2\alpha}{t^2} \right) \quad (5.4)$$

(5.1)式と(5.4)式を連立して P について整理すると、縦割裂耐力推定式は下式で表される。

$$P = F_e \cdot d / \left(\frac{\alpha+1}{t} - \frac{2\alpha}{t^2} \right) \quad (5.5)$$

蒲池らが提案したモデルでは、ドリフトピン端部の回転拘束を自由としていることや、ドリフトピンを弾性体と仮定していることなど、モデル化が不完全であることも多い。そのため、本式が適用できるのは材厚が薄く、ドリフトピンの曲げ変形が小さい試験体に限られる。また、本試験においては材厚 60mm 以下であれば概ね適用可能であると考えられた。

(5.5)式を用いて算出した割裂耐力を、計算値(端部ピン)と便宜上呼ぶこととする。実験より得られた F_e から計算した計算値(端部ピン)を Table 5.4~5.5 に示す。

Table 5.4 Calculated value of splitting strength. (Japanese cedar / Free end)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Calculated value Free end (kN)
Japanese cedar	12	27.5	30	9.8
			60	16.2
			90	15.6
			120	14.0
	16	26.1	30	12.5
			60	23.3
			90	27.9
			120	26.3

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

Table 5.5 Calculated value of splitting strength. (Douglas fir / Free end)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Calculated value Free end (kN)
Douglas fir	12	36.1	30	12.7
			60	19.4
			90	17.5
			120	16.3
	16	33.9	30	16.1
			60	29.2
			90	32.2
			120	29.2

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

一方で、ドリフトピン端部の回転拘束を固定と考える。Fig. 5.20 に接合部の変形性状が左右対称であると考え、弾性床理論の基本的な考え方から接合具のたわみ曲線は以下の微分方程式の解として表される。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + kdy = 0 \quad (5.6)$$

ここで、 E ：接合具のヤング係数(N/mm²)、 I ：接合具の断面 2 次モーメント(mm⁴)、 k ：木材の面圧定数(N/mm³)、 d ：接合具径(mm)、 x ：接合具中心からの距離(mm)、 y ： x 位置でのたわみ量(mm)

(5.6)式における近似解 y を、未定係数 A_i を用いた 5 次の多項式として以下のように表現する。

$$y = \sum_{i=0}^5 A_i x^i \quad (5.7)$$

(5.7)式中の 6 つの係数を決定するため、対称性と接合具端部での鋼板の拘束効果で回転拘束を剛とする仮定及び、蒲池らの研究⁷⁾を参考に最適化条件から次式に示す条件より近似解を導く。

$$\begin{aligned} \theta(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \theta(t/2) &= 0 \\ Q(t/2) &= P/2 \\ \int_0^{t/4} \left(EI \frac{d^4 y}{dx^4} + kdy \right) dx &= 0 \\ \int_{t/4}^{t/2} \left(EI \frac{d^4 y}{dx^4} + kdy \right) dx &= 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

ここで、 $\theta(x)$ ：たわみ角の近似解(°)、 $Q(x)$ ：せん断力の近似解(N)

(5.8)式から未定係数に関する連立方程式を解くことで、変形量の近似解を次式のように求めることができる。

$$y = \left\{ \left(\frac{1}{kdt} + \frac{6\beta EI t}{kd} \right) + \left(\frac{t}{48EI} + \frac{5\beta t^3}{16} \right) x^2 - \left(\frac{1}{24EI t} + \frac{5\beta t^3}{4} \right) x^4 + \beta x^5 \right\} \quad (5.9)$$

$$\beta = \frac{-5kdt^2/EI}{61kdt^4 + 92160EI} \quad (5.10)$$

曲げモーメントおよびせん断力の近似解は(5.10)式のパラメータ β を用いて、次式のようにそれぞれ表すことができる。

$$M(x) = -PEI \left\{ \left(\frac{t}{24EI} + \frac{5\beta t^3}{8} \right) - \left(\frac{1}{2EI t} + 15\beta t \right) x^2 + 20\beta x^3 \right\} \quad (5.11)$$

$$Q(x) = -PEI \left\{ - \left(\frac{1}{EI t} + 30\beta t \right) x + 60\beta x^2 \right\} \quad (5.12)$$

ここで、 $M(x)$ ：曲げモーメントの近似解(N・mm)

これより、支圧応力度は下式で表される。

$$\sigma_e(x) = \left\{ \frac{Q(x) - Q(x-1)}{d} \right\} = \frac{PEI}{d} \left\{ \left(\frac{1}{EI t} + 30\beta t \right) + 60\beta(1-2x) \right\} \quad (5.13)$$

$x=t/2$ の時、支圧応力度が最大となるのは明らかなので、

$$\sigma_{emax} = \sigma_e \left(\frac{t}{2} \right) = \frac{PEI}{d} \left(\frac{1}{EI t} - 30\beta t + 60\beta \right) \quad (5.14)$$

また、縦割裂が発生するのは(5.1)式の条件であるので、(5.1)式と(5.14)式を連立し、 P について整理すると、ドリフトピン端部の回転拘束を剛とした場合の縦割裂耐力推定式は下式で表される。

$$P = \frac{F_e \cdot d}{EI \left(\frac{1}{EI t} - 30\beta t + 60\beta \right)} \quad (5.15)$$

(5.15)式を用いて算出した割裂耐力を、計算値(端部固定)と便宜上呼ぶこととする。実験より得られた F_e から計算した計算値(端部固定)を Table 5.6~5.7 に示す。

Table 5.6 Calculated value of splitting strength. (Japanese cedar / Fixed end)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Calculated value Fixed end (kN)
Japanese cedar	12	27.5	30	9.9
			60	18.7
			90	23.5
			120	23.6
	16	26.1	30	12.5
			60	24.6
			90	34.5
			120	39.7

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

Table 5.7 Calculated value of splitting strength. (Douglas fir / Fixed end)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Calculated value Fixed end (kN)
Douglas fir	12	36.1	30	12.9
			60	23.9
			90	28.2
			120	27.3
	16	33.9	30	16.2
			60	31.6
			90	42.9
			120	47.0

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

5.4.2. 弾塑性フレーム解析による縦割裂耐力推定

材厚が厚く接合具の曲げ変形が大きくなる場合は、接合具の弾塑性挙動や接合具端部の回転拘束などを考慮しなければならない。そのため、前項のような計算式レベルに落とし込もうとすると非常に煩雑になる。そこで、5.2節で使用した弾塑性解析モデルを再利用して、初期き裂が入った時点での耐力を推定する。すなわち、母材のめりこみ剛性や接合具のヤング率、接合具端部の回転拘束などはそのままの条件(Fig. 5.2, Table 5.1, Table 5.2)とし、支圧応力度の最大値が、Table 5.8~5.9に示す F_e に達した瞬間の荷重を縦割裂耐力の解析による推定値としている。この条件により、前項の計算式では考慮できていない、接合具の弾塑性挙動や接合具端部の回転拘束を考慮した解析となっている。解析によって得られた解析値を Table 5.8~5.9に、詳細な解析条件及び結果を付録 C)に示す。

Table 5.8 Analytic value of splitting strength. (Japanese cedar)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Analytical value (kN)
Japanese cedar	12	27.5	30	9.7
			60	15.2
			90	23.3
			120	23.6
	16	26.1	30	12.5
			60	22.7
			90	34.1
			120	39.3

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

Table 5.9 Analytic value of splitting strength. (Douglas fir)

Wood species	Diameter of drift pin (mm)	Bearing strength (N/mm ²)	Thickness (mm)	Analytical value (kN)
Douglas fir	12	36.1	30	12.6
			60	17.9
			90	27.6
			120	26.8
	16	33.9	30	16.2
			60	28.0
			90	42.1
			120	45.4

Note: End margin: 7d, Edge margin: 1.5d-1.5d, d: Diameter of drift pin.

5.4.3. 実験値と推定値の比較

計算値、解析値(端部ピン・端部固定)、実験値との比較を Table 5.10～5.13、Fig. 5.21 に示す。ここで用いている計算値は 5.4.1 項で提案した計算式によるもの、解析値は 5.4.2 項の方法で解析的に算出した数値、実験値は、5.2.1 項で用いたものと同様に縁距離が両側で 1.5d ずつである試験体 A・Q・T・W の実験より得られた最大荷重の平均値としている。計算値(端部ピン)は、接合具が弾性体であること、接合具端部の回転拘束が生じないことを仮定しているため、接合具の変形が小さい材厚 60mm 以下ではその仮定条件に近い条件になる。そのため、材厚 60mm 以下では実験値と高い精度で一致した。一方で、接合具の変形が大きい材厚 90mm 以上では端部の回転拘束の影響が大きく、計算値(端部ピン)では実験値よりもかなり低く推定され、最も変形が大きい接合具が $\phi 12$ 、材厚 120mm の試験体では実験値と約 75%の誤差が生じていた。一方で計算値(端部固定)では、接合具端部の回転拘束が小さい材厚 60mm 以下の試験体では実験値よりも約 15%程度高く評価されたが、回転拘束条件が強い材厚 90mm 以上の試験体では高い精度で一致した。

解析では、材厚が 60mm 以下の試験体では接合部端部の回転拘束条件を自由とし、材厚が 90mm 以上の試験体については、接合具の弾塑性挙動や接合具端部の回転拘束を評価した。そのため、解析では計算値よりも実情に即した耐力推定が行われている。いずれの試験体においても、解析値は実験値と概ね誤差 10%程度以下となり、非常に高い精度で一致したと言える。

この結果より、材端の拘束条件が自由かつ接合具が弾性体と見なせる場合には計算値(端部ピン)で、それ以外の場合は計算値(端部固定)を用いるか、適切なモデル化をして解析を行うことにより縦割裂耐力が推定できることが明らかになった。

Table 5.10 Comparison between experimental value and estimated value of splitting strength.

(Wood species: Japanese cedar / Diameter of drift pin: $\phi 12$ / End margin: 7d / Edge margin: 1.5d-1.5d)

Type of specimen	Thickness (mm)	Calculated value	Calculated value	Analytic value (kN)	Experimental value (kN)
		Free end (kN)	Fixed end (kN)		
Japanese cedar Drift pin $\phi 12$	30	9.8	9.9	9.7	9.9
	60	16.2	18.7	15.2	16.0
	90	15.6	23.5	23.3	21.4
	120	14.0	23.6	23.6	24.6

Table 5.11 Comparison between experimental value and estimated value of splitting strength.

(Wood species: Japanese cedar / Diameter of drift pin: $\phi 16$ / End margin: 7d / Edge margin: 1.5d-1.5d)

Type of specimen	Thickness (mm)	Calculated value	Calculated value	Analytic value (kN)	Experimental value (kN)
		Free end (kN)	Fixed end (kN)		
Japanese cedar Drift pin $\phi 16$	30	12.5	12.5	12.5	12.5
	60	23.3	24.6	22.7	21.2
	90	27.9	34.5	34.1	32.0
	120	26.3	39.7	39.3	35.7

Table 5.12 Comparison between experimental value and estimated value of splitting strength.

(Wood species: Douglas fir / Diameter of drift pin: $\phi 12$ / End margin: 7d / Edge margin: 1.5d-1.5d)

Type of specimen	Thickness (mm)	Calculated value	Calculated value	Analytic value (kN)	Experimental value (kN)
		Free end (kN)	Fixed end (kN)		
Douglas fir Drift pin $\phi 12$	30	12.7	12.9	12.6	13.0
	60	19.4	23.9	17.9	22.5
	90	17.5	28.2	27.6	26.4
	120	16.3	27.3	26.8	28.7

Table 5.13 Comparison between experimental value and estimated value of splitting strength.

(Wood species: Douglas fir / Diameter of drift pin: $\phi 12$ / End margin: 7d / Edge margin: 1.5d-1.5d)

Type of specimen	Thickness (mm)	Calculated value	Calculated value	Analytic value (kN)	Experimental value (kN)
		Free end (kN)	Fixed end (kN)		
Douglas fir Drift pin $\phi 16$	30	16.1	16.2	16.2	16.3
	60	29.2	31.6	28.0	28.2
	90	32.2	42.9	42.1	42.2
	120	29.2	47.0	45.4	40.0

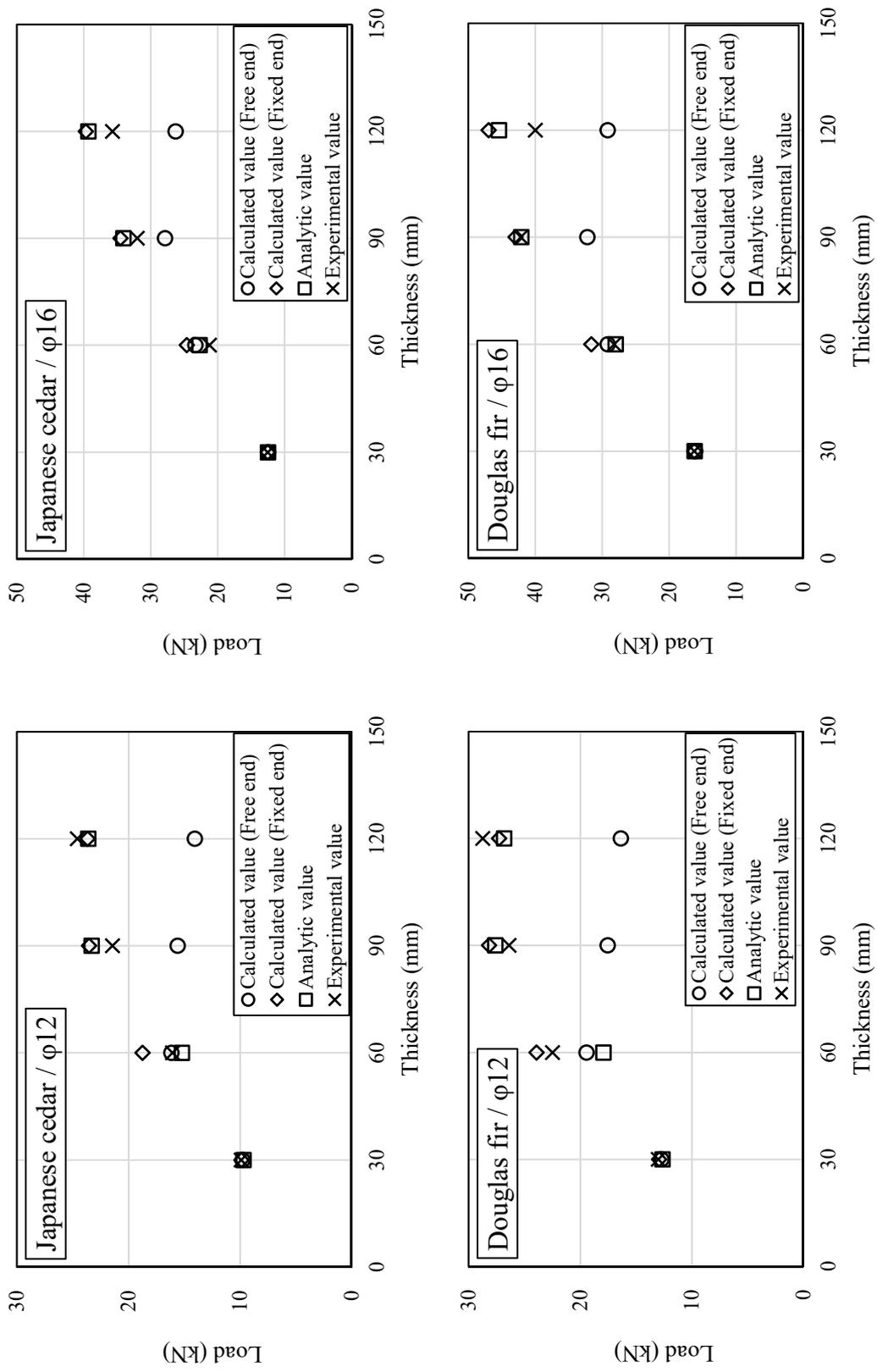


Fig. 5.21 Comparison between experimental value and estimated value of splitting strength. (End margin: 7d / Edge margin: 1.5d-1.5d)

5.5. まとめ

本章で、鋼板添え板ドリフトピン接合部を想定した繊維方向荷重時の割裂破壊について、その耐力発現から低下に至るまでのメカニズム及び耐力推定手法を提案した。

メカニズムについては第 4 章の縦割裂試験で見られた現象を矛盾なく説明でき、耐力推定手法についても計算及び解析による推定値によって試験で得られた割裂耐力を精度よく一致した。

本章で提案した割裂破壊メカニズムの根幹になる考え方を改めてまとめると

- ・ドリフトピンを用いて、本試験で使用した木材(スギ・ベイマツ)の繊維方向に支圧応力を加える場合、繊維直交方向加力時のような支圧降伏が起きずに支圧応力度が支圧強度に達した時点で割裂破壊が生じ、その後の塑性変形は割裂破壊による母材の開きによるものであること。

- ・ドリフトピンに曲げ変形が生じる場合では、ドリフトピンが母材に与える支圧応力度にラグが生じ、支圧応力度が最大となる箇所が支圧強度に達した時点で割裂が生じ始める。支圧応力度の最大箇所から、母材が塑性化することで、応力が再分配され、当初は応力が比較的低かった試験体中央部にも徐々に応力が流れ、終局破壊に至るということ。であり、最重要となる考え方である。

一方で、より精度のよい耐力推定法を提案するためには課題もある。

1. 接合部端部の回転拘束が発生する条件が不明である。

本研究の解析では実験結果を基に、材厚 90mm 以上の試験体で回転拘束が起こると考えたが、その条件は明らかでない。

2. 縁距離・材厚が長く、初期き裂発生以降も荷重が上昇する場合の評価ができない。

縦割裂による塑性変形が正確に評価できないため、塑性変形による荷重上昇がどの程度に達した時点で耐力が低下するかを評価できない。

また、これらの課題を解決すれば、メカニズム自体は変わらないので、例えば、鋼板挿入式ドリフトピン接合部や、接合具をボルトやビス、ラグスクリューとしたその他の接合形式においても応用ができると考えられる。

6. 結言

本論文では木材の割裂破壊のメカニズムを提案し、それを基に横引張応力によってスリットのような特異応力場を持つ構造物に発生する割裂破壊及びせん断力を主応力とする鋼板添え板ドリフトピン接合部における割裂破壊の耐力推定手法の提案を行った。

第 2 章及び第 3 章で、建材として一般的であるスギ・ヒノキ・カラマツ・ベイマツの製材について CT 試験を実施した。CT 試験は横引張力のみで割裂破壊を引き起こす試験法であり、木材の繊維直交方向加力時の割裂破壊を想定している。試験実施後に、CT 試験体を想定した FEM 解析を行い、応力分布や変形について解析的に検証した。そして、解析結果を基に変形量とエネルギー量の釣り合いから耐力を推定する手法を提案し、CT 試験結果と比較したところ概ね妥当であるという結果が得られた。また、耐力推定の際に必要なパラメータである割裂破壊定数を樹種毎に計測し、データの蓄積を行った。

第 4 章及び第 5 章で、スギ及びベイマツ製材について縦割裂試験を実施した。縦割裂試験はせん断力を主応力とした割裂破壊を引き起こす試験法であり、木材の繊維方向荷重時の割裂破壊を想定している。試験実施後に、縦割裂試験を想定した弾塑性フレーム解析を行い、接合具が母材に与える支圧応力度に注目し、接合具の曲げ変形を考慮した縦割裂メカニズムを提案した。本メカニズムにおいて最重要の考え方は、①支圧応力度の最大値が支圧強度に達した時点から割裂が始まることと、②割裂が始まると局所的な破壊と応力の再分配を繰り返しながら塑性化していくということ、である。そのメカニズムを基に、簡易計算式及び解析による耐力推定手法を提案した。その結果、計算及び解析による耐力推定は、高い精度で実験値と一致する結果が得られた。

特に縦割裂については、これまで明快なメカニズムや耐力推定法はなく、割裂破壊を回避するための設計手法しかなかったが、本論文でのメカニズムによって理論的な縦割裂耐力の推定手法が提案できたことは、未解明の部分が多い割裂破壊の研究にとって非常に大きな前進であると考えられる。この考え方は鋼板挿入ドリフトピン(ボルト)接合部や、接合具径の小さいビス接合においても応用できると考えられる。今後の解決していくべき課題としては、接合具端部の回転拘束の発生条件が不明であることや割裂後の塑性変形性能の正確な評価が難しいこと、第 2・3 章ではエネルギー量を基に、第 4・5 章では応力度を基に耐力推定手法を提案したためそれぞれの推定手法でパラメータが異なるということなどが挙げられる。また、緒言で列挙した問題点のうち、解決できてきた面もあるが、未解決な部分もある。

問題点 1：割裂破壊においてどのような応力が発生し、どの程度に達すれば破壊するのかについては、縦割裂試験のように純粋な軸力作用時を想定した場合では支圧応力度が支圧強度に達した時点で割裂が生じると結論付けたが、例えば複合応力作用時の割裂破壊やスリットのような特異応力場に生じる割裂破壊には、応力度と破壊条件の関係性は不明である。

問題点 2：複数の接合具から構成される場合の接合具間距離を考慮した推定ができないについては、本研究では対象としておらず未解決である。

問題点 3：ボルトが完全剛体となる場合を想定しており、塑性変形が生じる場合の推定ができないについては、第 5 章のように弾塑性解析を行えばかなりの精度で耐力を推定で

きることが明らかになった。Fig. 5.9 のような木材の塑性変形能力も評価できるようになれば、より精度よく耐力を推定することができると考えられる。

問題点 4：接合具がビスや釘のように材を貫通しない場合の推定ができないについては、本研究では対象としておらず未解決である。

問題点 5：加力方向が繊維直交方向以外の場合の推定ができないについては、本研究によって、繊維方向加力時の耐力推定が可能になった。今後の課題としては中間角度の耐力が推定できるように検証していく必要があると考えられる。

問題点 6：端距離の影響が考慮されていないについては、第 4 章の実験により、繊維方向荷重時では概ね端距離が 7d で、それ以下であればせん断破壊、それ以上であれば割裂破壊に移行していく様子が見られた。繊維直交荷重時についても検証していく必要があると考えられる。

問題点 7：比重をパラメータとしているが、異樹種間の破壊強度の違いが考慮されていないについては、第 3 章の実験により建材として一般的であるスギ・ヒノキ・カラマツ・ベイマツの繊維直交荷重時の割裂性について傾向を把握した。その他の樹種についても実験検証が必要であると考えられる。

本研究によって、木材の割裂現象について解決できた点もあるが、まだ未解決である点も多い。これらの問題を解決すれば、実務上より有益に設計式に発展していくと考えられる。

謝辞

稲山正弘教授に感謝いたします。稲山先生には、私が研究室に在籍して間もなく、木質構造学について何もわからない頃から、指導して頂きました。構造家として木造建築に触れることに魅力を感じ、木質構造学について深く興味を持てたのは先生のおかげです。就職して実務設計を行っていた時も博士課程で研究を行っていた時も、大きな壁を感じ、悩むことが多かった私ですが、そのような時に頂いたアドバイスは、人より回り道をしてきた先生らしく、“すぐには納得できないが、振り返った時に合点がいく”という漢方薬のようなタイプのもので、本当に神様か仙人のような人だと感じました。

青木謙治准教授に感謝いたします。青木先生は研究や論文、それ以外のことについてもよく相談に乗っていただきました。他の大学・研究機関の研究者とのつながりを大事にする先生で人望に厚く、研究者としての在り方についても学ぶことができました。その他にも、熊本地震の被害調査、学外の研究会なども誘っていただき、木材や木造住宅について、知見を広げることができました。

論文審査の副査として貴重な意見を頂きました、木材物理学研究室の信田聡教授、恒次祐子准教授、関東学院大学の神戸渡専任講師に感謝いたします。特に、神戸先生は木材の割裂について数多くの先行研究を行っており、本研究を進めるにあたり参考にさせていただきました。また、同じ割裂をテーマに研究を行っているという縁で、アドバイスを頂くことも多く、委員会活動などにも誘っていただき感謝しております。

博士課程入学前に勤務していた株式会社宮田構造設計事務所の宮田雄二郎所長に感謝いたします。苦しい事も多かったですが、研究を行うための基礎学力や明解のない事について考え抜く姿勢は勤務していた三年間で大いに培うことができました。

木質材料学研究室の皆に感謝いたします。学部生から社会人までバックグラウンドの異なる者が混在している研究室だったので、様々な視点から研究についての議論や有益なアドバイスを頂くことができました。また、私の目標であった五月祭パビリオンコンペの一等、耐力壁ジャパンカップのトーナメント優勝を達成することができたのも、皆の協力のおかげでした。

最後に、研究活動を精神的な面から支えて頂いた、家族と友人、そして妻の一恵に感謝いたします。

参考文献

1 章

- 1) 平成 22 年 10 月 1 日 法律第 36 号：公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律 (2010).
- 2) 平成 12 年 5 月 31 日 建設省告示第 1452 号：木材の基準強度 F_c 、 F_t 、 F_b 及び F_s を定める件 (2000).
- 3) 平成 13 年 6 月 12 日 国土交通省告示第 1024 号：特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件 (2001).
- 4) 木質構造基礎理論. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2010, pp40-43.
- 5) 木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp210-321.
- 6) 平井卓郎、沢田 稔：木材のボルト接合剪断耐力に及ぼす端部寸法影響－荷重が材軸方向に作用する場合. 木材学会誌 **28**(3), 137-142 (1982).
- 7) Van der Put, T. A. C. M., Leijten A. J. M.: Evaluation of perpendicular to grain failure of beams caused by concentrated loads of joints. Proceeding of the 33rd Meeting of CIB-W18 (2000).
- 8) 安村 基：繊維直交方向加力を受ける木質構造ボルト接合部における破壊荷重推定法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造Ⅲ, 65-66 (2006).
- 9) Eurocode 5 : Design of timber structures, European Commission (2002).
- 10) NDS : National Design Specification for Wood Construction, American Wood Council (2015).
- 11) 竹山謙三郎：木構造(増訂版), 丸善出版, pp43-44 (1952).
- 12) 飯塚五郎蔵：木材の曲げ強度に及ぼす切欠の影響(第一報). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, 22-24 (1948).
- 13) 飯塚五郎蔵：木材の曲げ強度に及ぼす切欠の影響(第二報). 日本建築学会研究報告 (8), 35-38 (1950).
- 14) 飯塚五郎蔵：木材の割裂強度(第一報), 日本建築学会研究報告(18), 1-2 (1952).
- 15) 鈴木弘志、佐々木栄一：アコースティック・エミッション法による木材の割裂破壊の評価. 日本材料学会学術講演会前刷(37), 340-342 (1988).
- 16) 青木謙治、槌本敬大：繊維方向加力を受ける製材－ボルト接合部の割裂強度の推定(第 1 報)端距離、加力速度及び材料物性が割裂強度に与える影響. 木材学会誌 **50**(5), 341-346 (2004).
- 17) 佐伯 浩：木材の破壊形態－木材の構造から見た基本形と用語. 日本材料学会材料 **37**(416), 529-534 (1988).
- 18) 杉山英男：引張側に欠き込みをもつ木質系の梁の曲げ耐力低下のメカニズムに関する若干の考察－木質構造の新しい設計体系確立のための提案と考察(第 9 報). 日本建築学会論文報告集 201, 1-10 (1972).
- 19) 桑村 仁：切欠き木材梁の割裂応力度－鉄骨木質構造の研究 その 1－. 日本建築学会構造系論文集 619, 111-118 (2007).

- 20) 桑村 仁：テーパー梁の応力分布－鉄骨木質構造の研究 その 3－. 日本建築学会構造系論文集 74(635), 83-90 (2009).
- 21) 桑村 仁：テーパー梁の破壊荷重から導かれる木材の割裂条件－鉄骨木質構造の研究 その 4－. 日本建築学会構造系論文集 74(641), 1295-1302 (2009).
- 22) 大河平行雄：木材の割裂に関する力学的研究. 東京大学学位論文(1974).
- 23) 大草克己：1.木材強度試験体(割裂・横引張・部分横圧縮)応力の数値的解析. 鹿児島大学農学部演習林報告 4, 1-84 (1976).
- 24) Yasumura, M., Daudeville, L.: Fracture Analysis of Bolted Timber Joints under Lateral Force Perpendicular to the Grain. Mokuzai Gakkaishi 42(3), 225-233 (1996).
- 25) Yasumura, M.: Determination of fracture parameter for dowel-type joints loaded perpendicular to wooden grain and its application. Proceeding of CIB-W18, Kyoto, Japan, Paper 35-7-9 (2002).
- 26) 岩崎晃治、安村 基：繊維著効方向加力を受けるボルト接合部における割裂破壊荷重の推定 割裂破壊パラメータの提案. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 273-274 (2005).
- 27) 神戸 渡、飯島泰男、岡崎泰男、板垣直行：CT 試験における幅、き裂長さ、強度等級がモード I 破壊靱性性能に与える影響 構造用集成材木材を対象としたモード I 破壊靱性性能の評価方法に関する考察 その 2. 日本建築学会構造系論文集 74(641), 1267-1274 (2009).
- 28) 神戸 渡、飯島泰男、中込忠男：構造用集成材木材を対象としたモード I 破壊靱性性能の評価方法に関する考察. 日本建築学会構造系論文集 73(631), 1593-1598 (2008).
- 29) 中込忠男、神戸 渡、伊倉裕太：繊維直交方向に引張加力を受けるカラマツ集成材ボルト接合の破壊特性の評価に関する破壊力学的研究. 日本建築学会構造系論文集 74(643), 1649-1658(2009).
- 30) 野口昌宏、中村 昇：破壊エネルギーを用いたクラックモデルの木材への適応性と破壊進行領域長さ. 日本建築学会構造系論文集 77(674), 521-527 (2012).
- 31) 平井卓郎：木材のボルト接合剪断耐力に及ぼす端部寸法影響－荷重が材軸に対し垂直方向に作用する場合. 木材学会誌 29(2), 118-122 (1983).
- 32) 平井卓郎：木材のボルト及びドリフトピン接合部のせん断耐力解析－1－ 繊維方向加力を受ける木材接合部の割裂破壊条件仮定. 木材学会誌 37(11), 1011-1016 (1991).
- 33) 平井卓郎：木材のボルト・ドリフトピン接合耐力に及ぼす径長比影響の評価法について. 木材学会誌 41(5), 459-466 (1995).
- 34) 田中 勝、宮澤健二：鋼板添え板ボルト接合部のせん断試験－縁端距離が耐力性状に及ぼす影響についての一考察. 日本建築学会構造工学論文集, B 50B, 303-308 (2004).
- 35) 田中 勝、宮澤健二：鋼板添え板ボルト接合部のせん断耐力に関する研究－縁端距離を考慮した降伏耐力および終局耐力の提案式. 日本建築学会構造系論文集, 589, 143-148 (2005).
- 36) 永松 恒、安村 基：木造用ボルト接合部の終局耐力推定法(その 1. 木材の繊維方向の力を受ける場合). 日本建築学会学術講演梗概集, C, 構造Ⅱ, 37-38 (1991).

- 37) 安村 基, 永松 恒: 木造用ボルト接合部の終局耐力推定法(その 2. 木材の繊維直交方向の力を受ける場合). 日本建築学会学術講演梗概集, C, 構造Ⅱ, 39-40 (1991).

2 章

- 1) 木質構造基礎理論. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2010, pp.53-57.
- 2) 中井善一、久保司郎: 破壊力学. 朝倉書店, 東京, 2014, pp.1-9.
- 3) ASTM E399-90: American Society for Testing and Materials (1997).
- 4) JSME S 001: 弾塑性破壊靱性 JIC 試験方法—増補第 1 版—. 日本機械学会, 丸善, 東京, 1992.
- 5) 吉原 浩、川村拓司: 木材のモードⅠの破壊じん性値の測定におよぼす試験方法の影響. 材料, 56(4), 311-315 (2007).
- 6) Gustafsson, P.J.: Fracture Perpendicular to Grain— Structural Applications. In S. Thelandersson, H.J. Larsen (Edit), Timber engineering, John Wiley & Sons Ltd, pp.103-130 (2003).
- 7) 三橋博三、星野正宏: 非線形破壊力学的手法を用いた集成材の割裂強度特性に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, 414, 11-19 (1990).
- 8) 神戸 渡、飯島泰男、中込忠男: 構造用集成材木材を対象としたモードⅠ破壊靱性性能の評価方法に関する考察. 日本建築学会構造系論文集, 73(631), 1593-1598 (2008).
- 9) 神戸 渡、飯島泰男、岡崎泰男、板垣直行: CT 試験における幅、き裂長さ、強度等級がモードⅠ破壊靱性性能に与える影響—構造用集成材木材を対象としたモードⅠ破壊靱性性能の評価方法に関する考察 その 2. 日本建築学会構造系論文集, 74(641), 1267-1274 (2009).
- 10) 木材工業ハンドブック改訂 4 版. 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, pp.133-138.
- 11) Merkle, J., Corten, H.: A J integral analysis for the compact specimen, considering axial force as well as bending effects. Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, pp.286-292 (1974).
- 12) Clarke, G., Landes, J.: Evaluation of the J integral for the compact specimen. Journal of Testing and Evaluation, Vol.7, No.5, pp.264-269 (1979).
- 13) 岡村弘之: 線形破壊力学入門. 培風館, 東京, 1976, pp.49-72.
- 14) 岩崎晃治、安村 基: 繊維著効方向加力を受けるボルト接合部における割裂破壊荷重の推定 割裂破壊パラメータの提案. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 273-274 (2005).

3 章

- 1) 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp.210-321.
- 2) 岩崎晃治、安村 基: 繊維著効方向加力を受けるボルト接合部における割裂破壊荷重の推定 割裂破壊パラメータの提案. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 273-274 (2005).

- 3) 神戸 渡、飯島泰男、中込忠男：構造用集成材木材を対象としたモードI破壊靱性性能の評価方法に関する考察. 日本建築学会構造系論文集, **73**(631),1593-1598 (2008).
- 4) 神戸 渡、飯島泰男、岡崎泰男、板垣直行：CT 試験における幅、き裂長さ、強度等級がモードI破壊靱性性能に与える影響－構造用集成材木材を対象としたモードI破壊靱性性能の評価方法に関する考察 その2. 日本建築学会構造系論文集, **74**(641), 1267-1274 (2009).
- 5) Yasumura, M.: Determination of fracture parameter for dowel-type joints loaded perpendicular to wooden grain and its application. Proceeding of the 35th Meeting of CIB-W18, Kyoto, Japan, 2002, Paper 35-7-9.
- 6) 岩崎晃治、安村 基：繊維直交方向加力を受けるボルト接合部における割裂破壊荷重の推定 割裂破壊パラメータの提案. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造III, 273-274 (2005).
- 7) 木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp222-238.
- 8) Clarke, G., Landes, J.: Evaluation of the J integral for the compact specimen, J. of Testing and Evaluation, **7**(5), 264-269 (1979).
- 9) 落合 陽、青木謙治、稲山正弘：CT 試験による製材の割裂破壊パラメータの算出と考察. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造III, 49-50 (2016).

4 章

- 1) 蒲池 健、稲山正弘、安藤直人：鋼板挿入式ボルト・ドリフトピン接合部における荷重－すべり特性の評価法. 日本建築学会構造系論文集 **627**, 795-802 (2008).
- 2) 蒲池 健、稲山正弘、井上雅文、安藤直人：鋼板添え板式ボルト接合部における荷重－すべり特性の評価法. 日本建築学会構造系論文集 **73**(631), 1599-1606 (2008).
- 3) 木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp222-285.
- 4) 平井卓郎、沢田 稔：木材のボルト接合部剪断耐力に及ぼす端部寸法影響－荷重が材軸方向に作用する場合. 木材学会誌, **28**(3), 137-142 (1982).
- 5) 青木謙治、槌本敬大：繊維方向加力を受ける製材－ボルト接合部の割裂強度の推定(第1報)－端距離、加力速度および材料物性が割裂強度に与える影響. 木材学会誌, **50**(5), 341-346 (2004).
- 6) 桑村 仁：繊維方向荷重を受ける木材ボルト接合部の端距離 $7d$ に対する疑問. 日本建築学会学術講演梗概集, 構造III, 587-588 (2012).
- 7) 田中 勝、宮澤健二：鋼板添え板ボルト接合部のせん断試験－縁端距離が耐力性状に及ぼす影響についての一考察. 構造工学論文集, **50 B**, 303-308 (2004).
- 8) 田中 勝、宮澤健二：鋼板添え板ボルト接合部のせん断耐力に関する研究－縁端距離を考慮した降伏耐力および終局耐力の提案式. 日本建築学会構造系論文集, **589**, 143-148 (2005).

- 9) Hanhijarvi, A., Kevarinmaki, A.: Timber failure mechanisms in high-capacity dowelled connections of timber to steel – experimental design and results. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Publication, vol. 677 (2008).
- 10) Jorissen, A.: Double shear timber connections with dowel type fasteners. Ph.D. Thesis, Delft University Press, Delft, Netherlands (1998).
- 11) Sjödin, J., Serrano, E., Enquist, B.: An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints. *Holz Roh Werkst*, **66**(5), 363-372 (2008).
- 12) 桑村 仁：繊維方向荷重を受ける単一ボルト接合部木材の破壊形式－鉄骨木質構造の研究 その15. 日本建築学会構造系論文集, **78**(685), 529-538 (2013).
- 13) 桑村 仁：繊維方向荷重を受ける単一ボルト接合部の木材の破壊強さ－鉄骨木質構造の研究その16. 日本建築学会構造系論文集, **78**(691), 1575-1584 (2013).
- 14) Zarnani, P., Quenneville, P.: Splitting strength of small dowel-type timber connections. *Journal of Structural Engineering*, **140**(10), 1-13 (2014).
- 15) Yasumura, M., Murota, T., Sakai, H.: Ultimate properties of bolted joints in glued-laminated timber. Proceeding of CIB-W18, Dublin, Ireland, Paper20-7-3 (1987).

5章

- 1) 桑村 仁：切欠き木材梁の割裂応力度－鉄骨木質構造の研究 その1－. 日本建築学会構造系論文集 **619**, 111-118 (2007).
- 2) 桑村 仁：テーパー梁の応力分布－鉄骨木質構造の研究 その3－. 日本建築学会構造系論文集 **74**(635), 83-90 (2009).
- 3) 桑村 仁：テーパー木梁の破壊荷重から導かれる木材の割裂条件－鉄骨木質構造の研究 その4－. 日本建築学会構造系論文集 **74**(641), 1295-1302 (2009).
- 4) 桑村 仁：円孔内圧による木材の割裂－鉄骨木質構造の研究 その5－. 日本建築学会構造系論文集 **75**(647), 175-184 (2010).
- 5) 桑村 仁：繊維方向荷重を受ける単一ボルト接合部木材の破壊形式－鉄骨木質構造の研究 その15－. 日本建築学会構造系論文集 **78**(685), 529-538 (2013).
- 6) 桑村 仁：繊維方向荷重を受ける単一ボルト接合部木材の破壊強さ－鉄骨木質構造の研究 その16－. 日本建築学会構造系論文集 **78**(691), 1575-1584 (2013).
- 7) 蒲池 健、稲山正弘、井上雅文、安藤直人：鋼板添え板式ボルト接合部における荷重－すべり特性の評価法. 日本建築学会構造系論文集 **73**(631), 1599-1606 (2008).
- 8) Sawata, K., Yasumura, M.: Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners, *Journal of Wood Science*, **48**, 138-146 (2002).
- 9) 木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp222-238.
- 10) 木質構造接合部設計マニュアル. 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2009, pp252-264.

付録

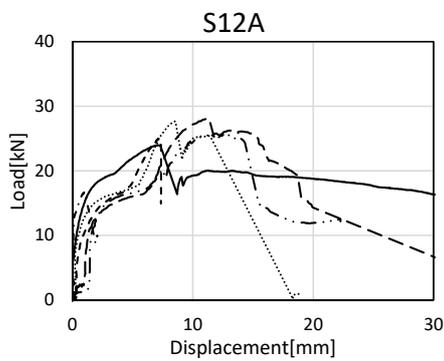
A) 縦割裂試験 試験結果一覧		
A-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12	…	3
A-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16	…	16
A-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12	…	29
A-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16	…	42
B) 縦割裂試験 解析結果一覧		
B-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12	…	55
B-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16	…	59
B-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12	…	63
B-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16	…	67
C) 縦割裂耐力推定 解析結果一覧		
C-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12	…	71
C-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16	…	75
C-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12	…	79
C-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16	…	83

A) 縦割裂試験 試験結果一覧

A-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12

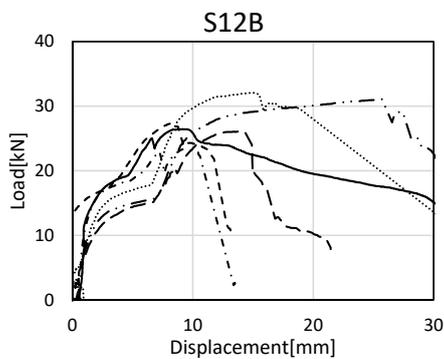
試験体 S12A 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	1.5d	120	375.6	13.28	4.53	25.80	Splitting
A2							349.1	12.71		27.67	Splitting
A3							323.4	11.30		28.13	Splitting
A4							379.6	13.09		23.97	Splitting
A5							367.9	12.45		24.97	Splitting
A6							444.6	13.85		16.87	Splitting



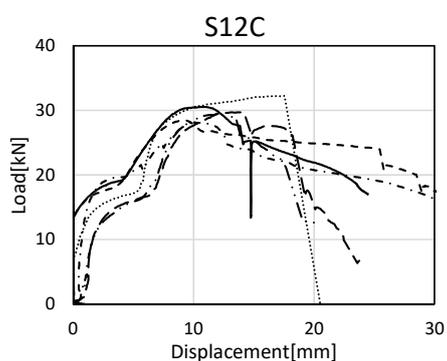
試験体 S12B 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	3d	120	370.9	13.00	4.53	31.07	Splitting
A2							392.8	11.97		32.07	Splitting
A3							317.9	12.13		26.07	Splitting
A4							387.0	13.91		26.47	Splitting
A5							384.4	17.53		27.40	Splitting
A6							439.6	14.96		23.30	Splitting



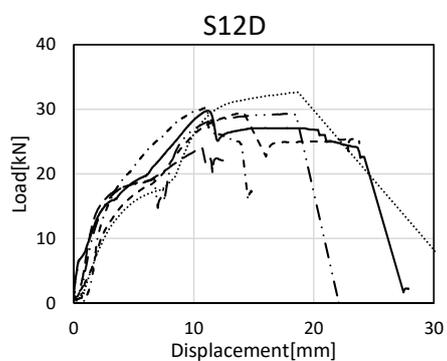
試験体 S12C 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	6d	120	370.6	14.14	4.53	29.60	Splitting
A2							388.5	14.12		32.23	Splitting
A3							341.8	12.37		29.70	Splitting
A4							388.0	12.96		30.53	Splitting
A5							378.0	16.26		28.43	Splitting
A6							471.4	15.07		28.13	Splitting



試験体 S12D 結果一覧

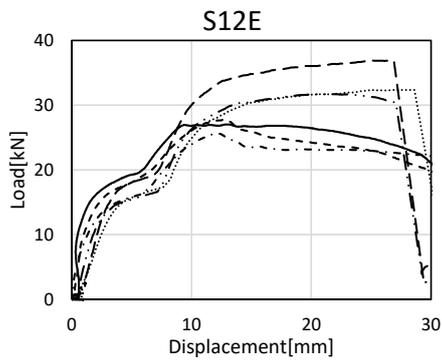
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	9d	120	400.8	8.38	5.45	29.37	Splitting
C2							376.3	9.00		32.63	Splitting
C3							374.2			23.97	Splitting
C4							428.9	9.53		29.77	Splitting
C5							374.5	14.40		29.47	DP slipping
C6							381.8	8.55		30.23	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S12E 結果一覧

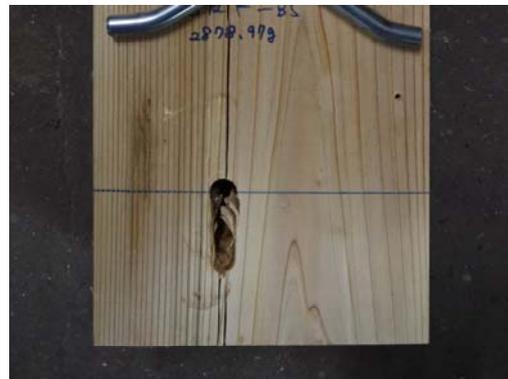
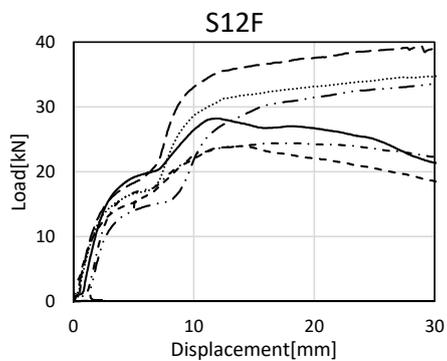
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	3d	9d	120	397.4	14.25	4.73	27.03	DP slipping
B2							380.9	13.90		27.73	DP slipping
B3							404.3	18.19		25.60	DP slipping
B4							352.7	11.95		31.70	Splitting
B5							365.3	10.20		32.37	Splitting
B6							417.7	9.55		36.90	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S12F 結果一覧

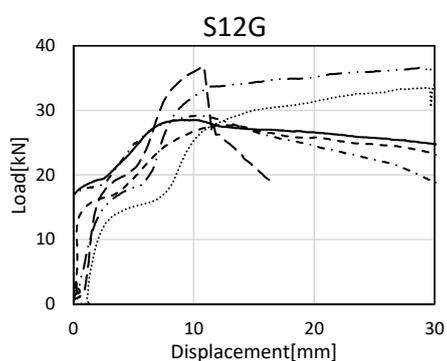
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	6d	9d	120	401.4	11.27	4.73	28.20	DP slipping
B2							380.3	16.25		23.97	DP slipping
B3							398.5	15.74		24.40	DP slipping
B4							362.1	12.48		36.83	DP slipping
B5							366.2	9.69		36.00	Splitting
B6							403.7	9.85		41.53	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S12G 結果一覧

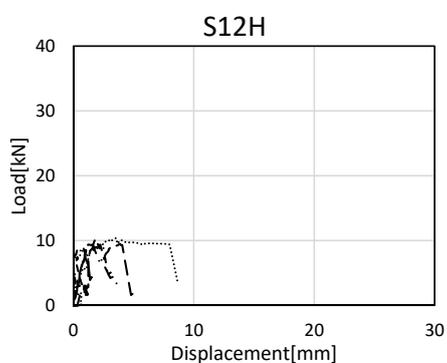
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	9d	9d	120	392.0	13.93	4.73	28.50	DP slipping
B2							394.0	13.04		27.73	DP slipping
B3							408.4	15.78		29.20	DP slipping
B4							375.6	12.14		37.37	Splitting
B5							367.8	12.46		34.47	Splitting
B6							402.2	10.58		36.80	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

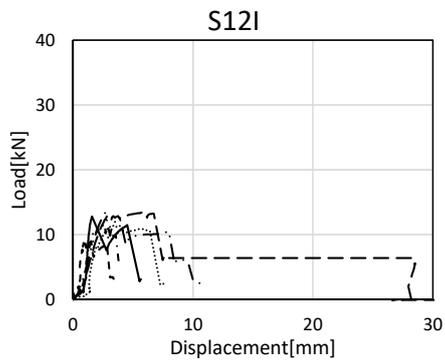
試験体 S12H 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	2d	1.5d	1.5d	120	345.6	13.61	4.53	10.33	Shear
A2							407.1	14.35		10.40	Shear
A3							335.0	13.10		9.43	Splitting
A4							362.3	11.40		8.53	Shear
A5							368.8	13.59		8.10	Splitting
A6							450.2	13.19		9.27	Shear



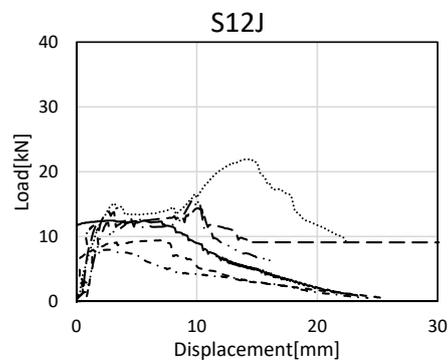
試験体 S12I 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	12mm	2d	1.5d	9d	120	434.1	10.74	5.45	13.40	Shear
C2							406.1	10.42		11.50	Shear
C3							377.3	10.29		13.47	Shear
C4							431.0	8.96		12.80	Shear
C5							379.8	11.41		9.07	Shear
C6							378.3	8.57		11.70	Shear



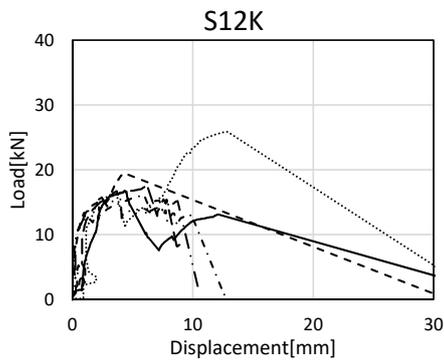
試験体 S12J 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	12mm	2d	9d	9d	120	326.4	11.79	4.31	12.50	Shear
D2							357.0	16.44		9.47	Shear
D3							350.7	9.66		11.83	Shear
D4							366.8	8.49		15.70	Shear
D5							402.9	7.81		21.97	Shear
D6							405.7	9.37		14.40	Shear



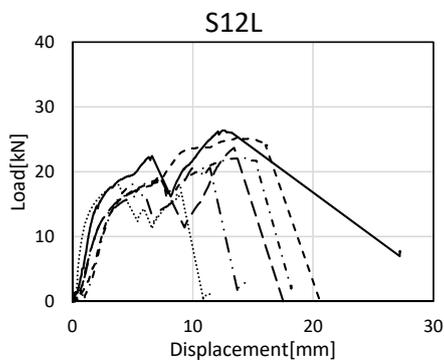
試験体 S12K 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	4d	1.5d	1.5d	120	382.0	14.29	4.53	15.73	Splitting
A2							362.5	14.27		25.87	Shear
A3							319.6	11.41		17.87	Splitting
A4							398.4	10.49		16.77	Shear
A5							388.1	13.88		19.50	Shear
A6							446.9	11.70		16.10	Shear



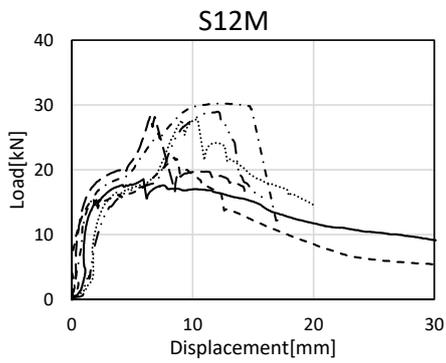
試験体 S12L 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	12mm	4d	1.5d	9d	120	408.8	10.41	5.45	20.63	Splitting
C2							380.7	10.38		18.10	Shear
C3							391.2	9.33		23.70	Shear
C4							440.9	8.37		26.37	Shear
C5							369.0	9.96		25.53	Shear
C6							382.2	7.63		22.13	Splitting



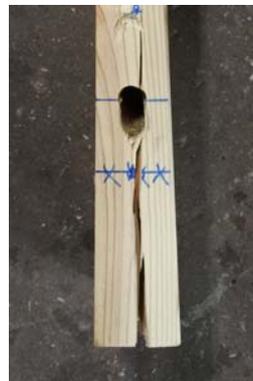
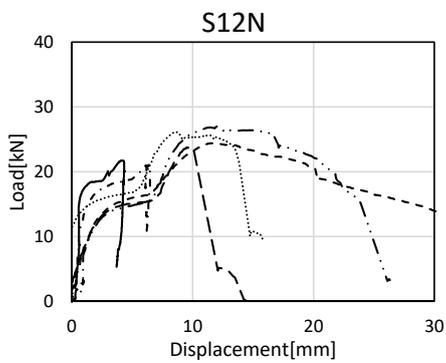
試験体 S12M 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	12mm	4d	9d	9d	120	376.7	11.46	4.73	18.57	Shear
B2							366.1	11.57		21.87	Shear
B3							387.4	13.07		30.23	Shear
B4							371.0	11.40		28.97	Splitting
B5							365.4	10.13		27.73	Splitting
B6							394.5	8.95		28.23	Shear



試験体 S12N 結果一覧

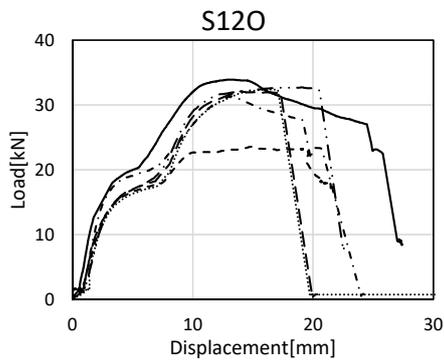
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	12mm	10d	1.5d	1.5d	120	350.8	13.54	4.53	27.03	Splitting
A2							359.6	13.39		26.17	Splitting
A3							318.5	11.62		23.77	Splitting
A4							381.1	8.69		21.73	Splitting
A5							361.6	13.45		24.43	Splitting
A6							470.5	11.83		21.07	Jig failure



※Jig failure は試験中に加力治具が破壊し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S12O 結果一覧

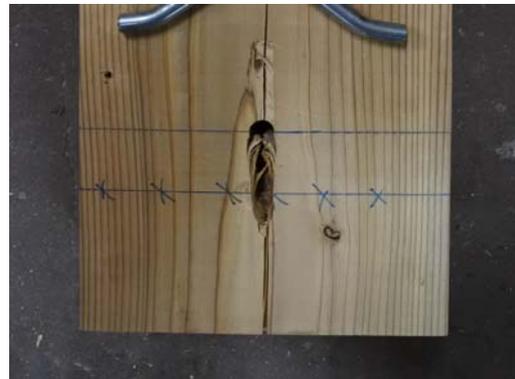
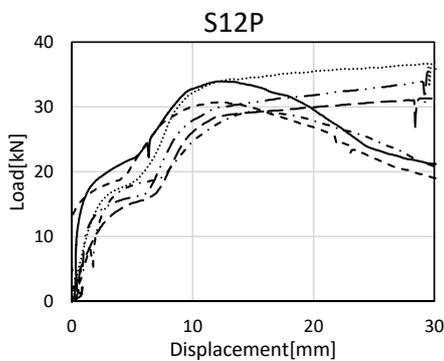
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1							397.5	9.14	5.45	32.73	Splitting
C2							390.6	9.57	5.45	32.40	Splitting
C3	Japanese cedar (S)	12mm	10d	1.5d	9d	120	404.0	8.00	5.45	32.10	Splitting
C4							428.4	10.75	33.90	Splitting	
C5							371.5	14.31	23.57	DP slipping	
C6							368.5	8.81	31.33	Splitting	



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S12P 結果一覧

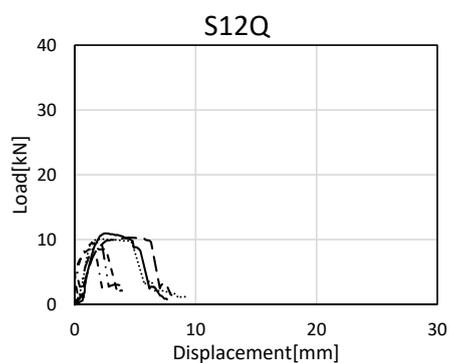
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1							437.8	7.25	5.06	33.93	DP slipping
E2							364.5	8.05	5.06	30.70	DP slipping
E3	Japanese cedar (S)	12mm	10d	9d	9d	120	455.6	11.82	5.06	29.33	DP slipping
E4							382.6	13.20	36.70	Splitting	
E5							351.0	10.31	37.10	Splitting	
E6							397.3	14.51	31.33	Splitting	



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

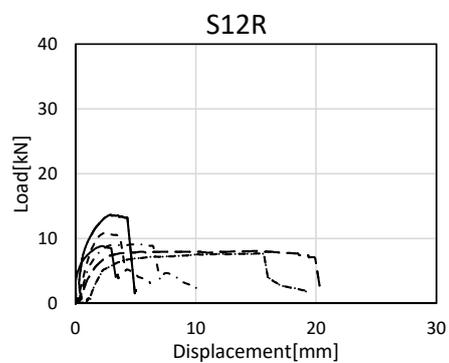
試験体 S12Q 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	1.5d	30	387.1	7.29	5.06	10.97	Shear
E2							330.7	8.15		8.63	Splitting
E3							380.7	8.43		9.50	Splitting
E4							412.6	10.71		9.83	Splitting
E5							360.8	9.64		10.10	Splitting
E6							389.1	11.53		10.33	Splitting



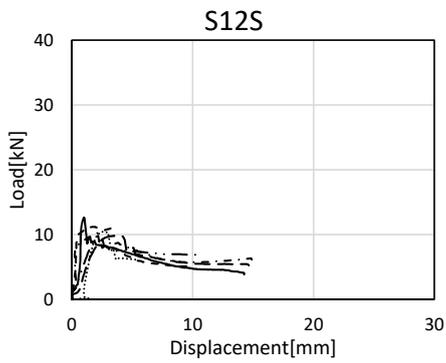
試験体 S12R 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	9d	30	487.9	12.18	5.06	13.70	Splitting
E2							385.0	15.46		7.73	Splitting
E3							465.3	23.73		8.10	Splitting
E4							394.1	—		8.87	Splitting
E5							438.0	10.48		10.90	Splitting
E6							391.2	11.66		9.13	Splitting



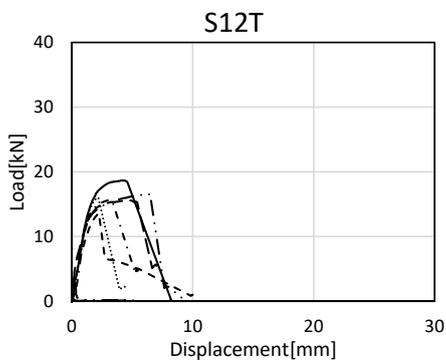
試験体 S12S 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	9d	9d	30	440.8	9.01	5.06	12.63	Splitting
E2							374.9	12.12		11.20	Splitting
E3							456.3	19.06		10.97	Splitting
E4							384.3	11.95		9.93	Splitting
E5							380.1	11.34		10.43	Splitting
E6							385.1	12.73		9.87	Splitting



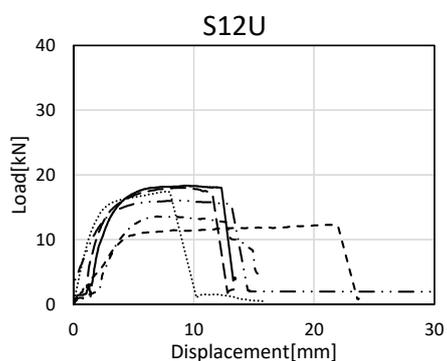
試験体 S12T 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	1.5d	60	378.3	7.76	5.06	18.67	Shear
E2							316.6	9.42		13.63	Shear
E3							355.9	9.76		15.67	Splitting
E4							402.1	11.66		16.63	Shear
E5							344.1	9.88		16.03	Splitting
E6							384.5	12.58		15.60	Splitting



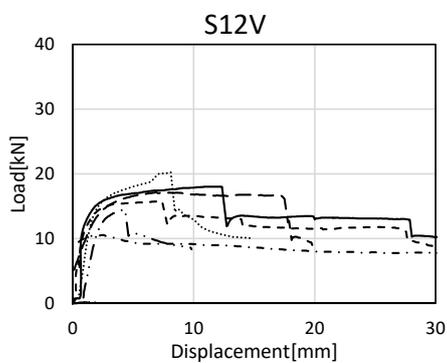
試験体 S12U 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	9d	60	453.6	16.26	5.06	18.33	Splitting
E2							396.4	15.26		12.33	Splitting
E3							484.0	33.62		13.67	Splitting
E4							361.1	—		16.07	Splitting
E5							428.7	12.27		17.40	Splitting
E6							389.4	10.72		18.03	Splitting



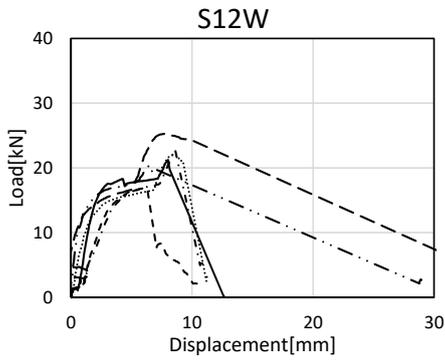
試験体 S12V 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	9d	9d	60	459.1	14.36	5.06	18.03	Splitting
E2							400.1	16.98		15.77	Splitting
E3							497.7	28.39		10.57	Splitting
E4							372.0	13.77		16.63	Splitting
E5							355.0	12.93		16.03	Splitting
E6							368.4	13.26		15.60	Splitting



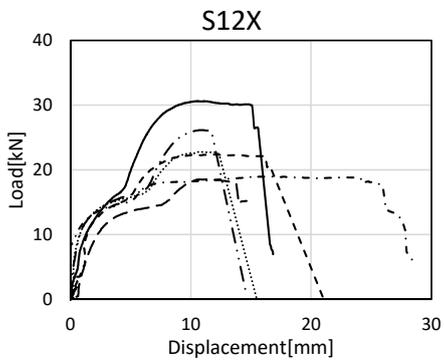
試験体 S12W 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	1.5d	90	389.7	8.03	5.06	21.20	Shear
E2							322.7	9.40		16.87	Shear
E3							371.2	12.16		22.90	Splitting
E4							422.6	11.93		20.27	Splitting
E5							294.9	10.58		22.07	Splitting
E6							381.4	12.79		25.30	Splitting



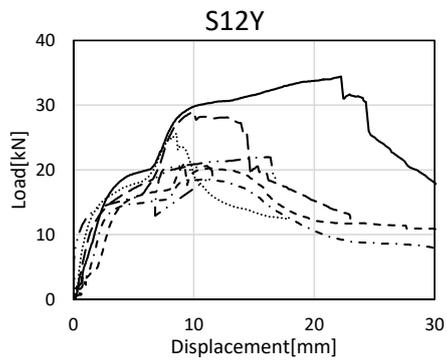
試験体 S12X 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	1.5d	9d	90	463.0	16.37	5.06	30.63	Splitting
E2							377.5	18.30		22.40	Splitting
E3							481.1	32.74		18.97	Splitting
E4							379.2	—		26.13	Splitting
E5							428.7	—		22.80	Splitting
E6							428.6	—		18.53	Splitting



試験体 S12Y 結果一覧

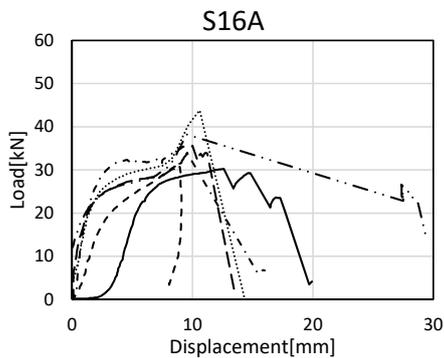
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	12mm	7d	9d	9d	90	449.3	11.88	5.06	34.40	Splitting
E2							347.0	13.03		21.00	Splitting
E3							472.6	20.91		18.57	Splitting
E4							399.0	—		22.00	Splitting
E5							377.0	12.98		25.60	Splitting
E6							390.9	14.24		28.93	Splitting



A-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16

試験体 S16A 結果一覧

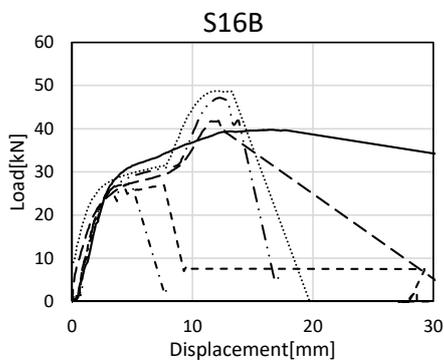
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	1.5d	120	354.9	12.64	4.53	38.20	Splitting
A2							386.8	12.70		43.80	Splitting
A3							333.5	11.21		35.63	Splitting
A4							372.7	11.82		30.23	Splitting
A5							345.4	10.74		30.93	Jig failure
A6							477.3	12.53		35.47	Splitting



※Jig failure は試験中に加力治具が破壊し、荷重が低下したことを表す。

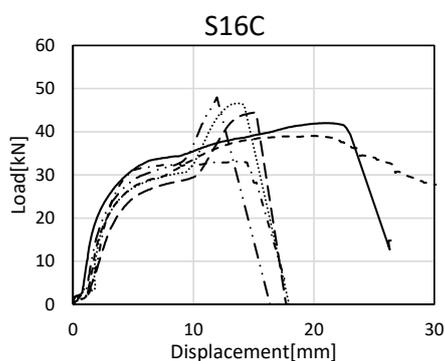
試験体 S16B 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	3d	120	386.0	13.20	4.53	47.13	Splitting
A2							400.1	15.22		48.70	Splitting
A3							337.1	12.57		41.83	Splitting
A4							377.1	11.49		39.77	Splitting
A5							373.0	10.62		27.23	Splitting
A6							448.1	9.74		27.43	Splitting



試験体 S16C 結果一覧

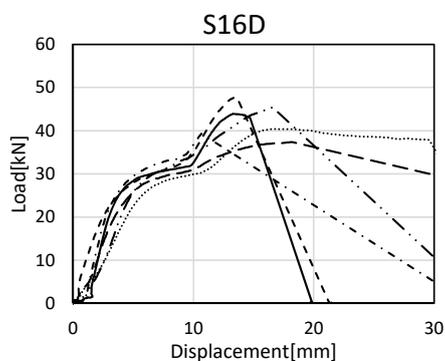
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	6d	120	393.2	10.44	4.53	47.97	Splitting
A2							378.5	9.97		46.63	Splitting
A3							334.8	10.39		44.43	Splitting
A4							378.8	9.32		42.00	DP slipping
A5							356.0	9.29		39.00	Splitting
A6							451.9	7.74		33.17	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

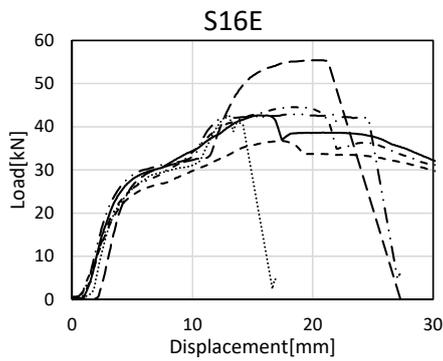
試験体 S16D 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	9d	120	396.2	11.12	4.73	45.43	Splitting
B2							359.5	10.80		40.40	Splitting
B3							393.4	12.13		37.33	Splitting
B4							361.6	11.61		43.90	Shear
B5							386.4	8.87		47.73	Shear
B6							390.6	9.13		39.30	Shear



試験体 S16E 結果一覧

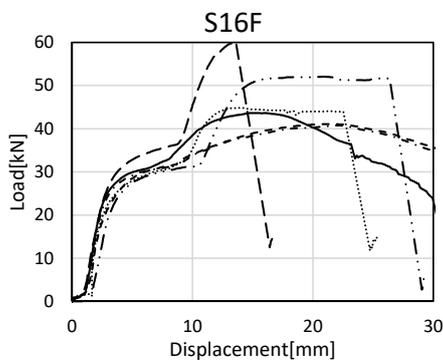
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	3d	9d	120	400.5	14.49	4.73	42.63	DP slipping
B2							359.6	10.02		36.67	DP slipping
B3							388.5	7.34		44.53	DP slipping
B4							368.9	12.73		42.90	Shear
B5							370.8	11.82		42.70	Shear
B6							398.5	10.46		55.40	Shear



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S16F 結果一覧

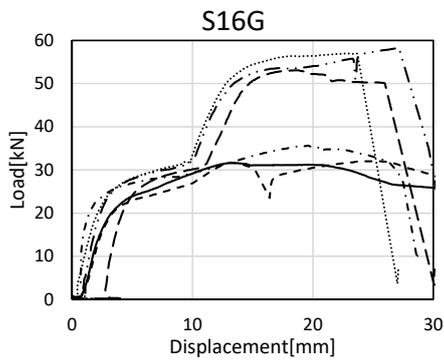
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	6d	9d	120	384.6	8.96	4.73	43.63	Splitting
B2							392.5	7.54		41.10	DP slipping
B3							385.0	9.01		40.77	DP slipping
B4							383.5	10.01		52.07	Shear
B5							378.3	9.37		44.80	Splitting
B6							423.6	7.70		60.27	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S16G 結果一覧

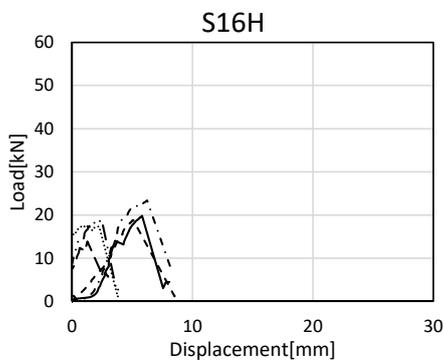
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	9d	9d	120	319.7	10.15	4.31	31.60	DP slipping
D2							339.9	10.30		32.00	DP slipping
D3							335.9	7.60		35.60	DP slipping
D4							352.9	9.71		58.30	Splitting
D5							368.0	11.44		56.97	Shear
D6							383.8	10.88		53.07	Shear



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

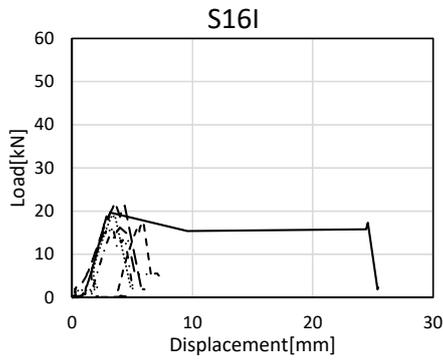
試験体 S16H 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	2d	1.5d	1.5d	120	339.4	13.77	4.53	18.90	Shear
A2							367.1	12.88		17.73	Shear
A3							319.8	12.53		13.87	Splitting
A4							362.9	11.54		19.77	Shear
A5							362.1	11.44		18.87	Shear
A6							450.2	11.92		23.37	Splitting



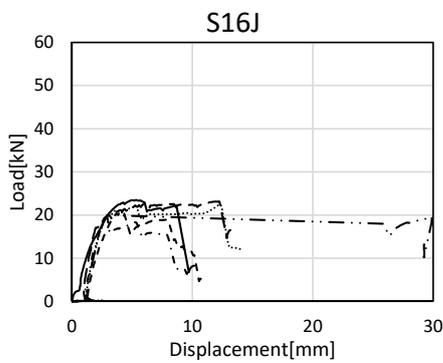
試験体 S16I 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	16mm	2d	1.5d	9d	120	388.5	9.65	5.45	16.27	Shear
C2							397.8	10.31		19.50	Shear
C3							377.1	8.37		21.93	Shear
C4							431.9	8.50		19.70	Shear
C5							369.2	10.18		17.60	Shear
C6							363.9	7.96		16.37	Shear



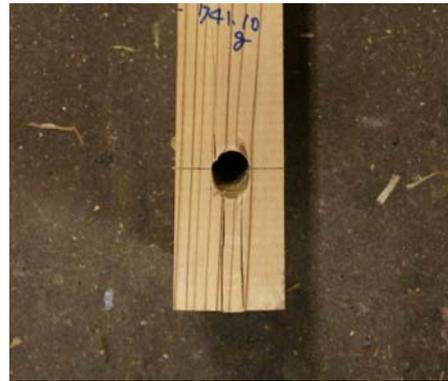
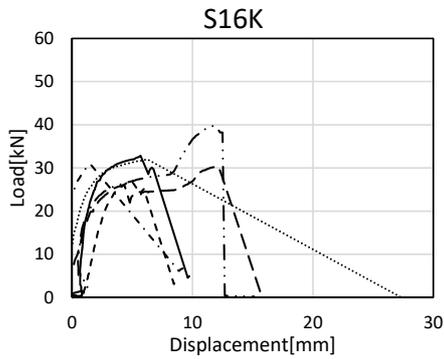
試験体 S16J 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	2d	9d	9d	120	313.9	12.23	4.31	23.47	Shear
D2							327.6	13.92		20.87	Shear
D3							336.0	11.15		19.47	Shear
D4							353.4	8.63		19.97	Shear
D5							371.3	9.49		22.50	Shear
D6							377.3	10.41		23.17	Shear



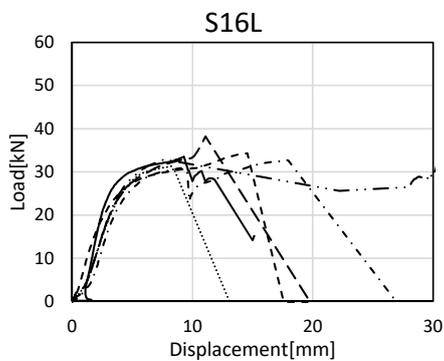
試験体 S16K 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	4d	1.5d	1.5d	120	360.2	14.13	4.53	39.70	Shear
A2							368.7	12.98		31.97	Shear
A3							333.7	12.04		30.20	Splitting
A4							374.0	12.60		32.80	Shear
A5							354.7	12.29		27.10	Shear
A6							444.4	12.09		30.83	Splitting



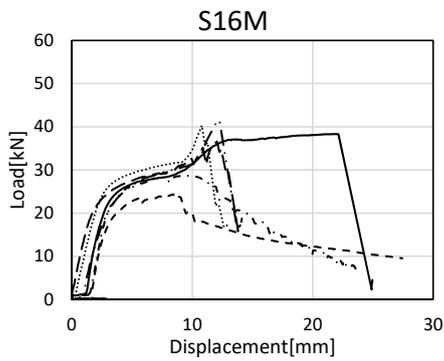
試験体 S16L 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	16mm	4d	1.5d	9d	120	377.1	9.70	5.45	41.13	Shear
C2							379.3	9.97		31.30	Shear
C3							371.7	9.08		38.20	Shear
C4							426.9	8.72		33.53	Shear
C5							365.1	10.82		34.30	Shear
C6							363.3	8.34		32.67	Splitting



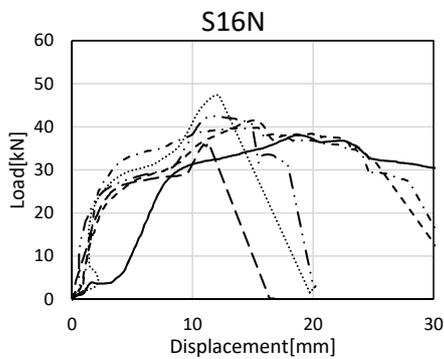
試験体 S16M 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	4d	9d	9d	120	322.7	10.95	4.31	38.30	Shear
D2							315.5	11.63		24.40	Shear
D3							342.6	9.77		29.33	Splitting
D4							354.1	7.72		41.40	Shear
D5							370.4	6.60		40.27	Shear
D6							371.3	9.88		36.60	Shear



試験体 S16N 結果一覧

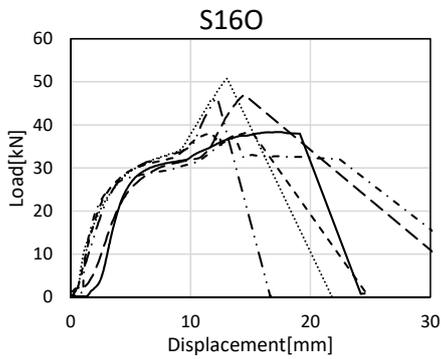
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Japanese cedar (S)	16mm	10d	1.5d	1.5d	120	345.6	12.88	4.53	42.50	DP slipping
A2							385.1	12.52		47.37	Splitting
A3							314.1	10.63		36.37	Splitting
A4							382.9	10.89		38.03	Splitting
A5							366.0	11.66		41.47	Splitting
A6							462.1	11.01		39.80	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 S16O 結果一覧

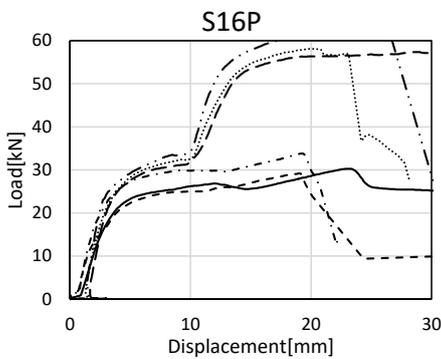
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Japanese cedar (S)	16mm	10d	1.5d	9d	120	380.9	8.47	5.45	46.23	Shear
C2							385.5	9.12		50.77	Shear
C3							371.1	7.63		47.03	Splitting
C4							420.6	6.90		38.33	Splitting
C5							365.0	7.19		38.27	Splitting
C6							361.6	6.36		36.73	DP slipping



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑り落ち、荷重が低下したことを表す。

試験体 S16P 結果一覧

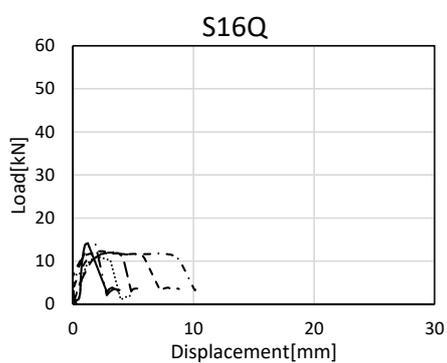
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	10d	9d	9d	120	329.8	10.83	4.31	30.27	DP slipping
D2							319.3	11.33		29.20	DP slipping
D3							335.5	7.57		33.80	DP slipping
D4							359.1	8.10		64.37	Splitting
D5							379.4	7.84		58.10	Splitting
D6							399.6	8.91		57.37	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑り落ち、荷重が低下したことを表す。

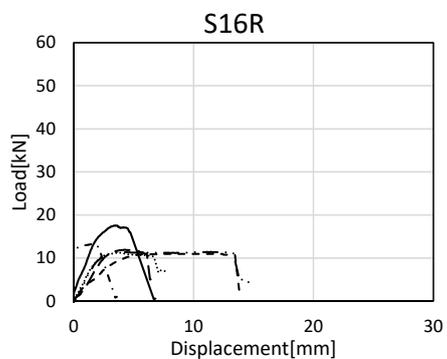
試験体 S16Q 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	1.5d	30	416.5	9.06	5.06	14.20	Splitting
E2							354.9	10.47		11.83	Splitting
E3							371.8	10.92		12.30	Splitting
E4							413.1	10.64		14.07	Splitting
E5							356.6	10.61		10.87	Splitting
E6							391.6	11.96		12.00	Splitting



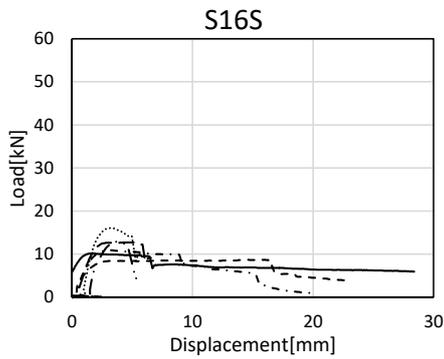
試験体 S16R 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	9d	30	449.0	9.76	5.06	17.53	Splitting
E2							361.0	11.39		11.00	Splitting
E3							445.0	10.98		13.20	Splitting
E4							381.4	10.86		11.43	Splitting
E5							361.5	8.69		11.20	Splitting
E6							385.0	11.60		11.90	Splitting



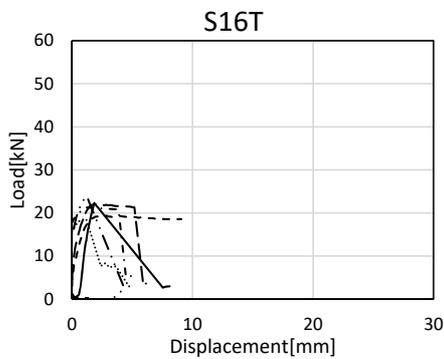
試験体 S16S 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	9d	9d	30	328.5	10.72	4.31	10.17	Splitting
D2							338.3	12.23		8.67	Splitting
D3							332.5	8.16		10.87	Splitting
D4							389.8	8.28		12.87	Splitting
D5							374.3	8.96		16.03	Splitting
D6							382.7	11.50		12.70	Splitting



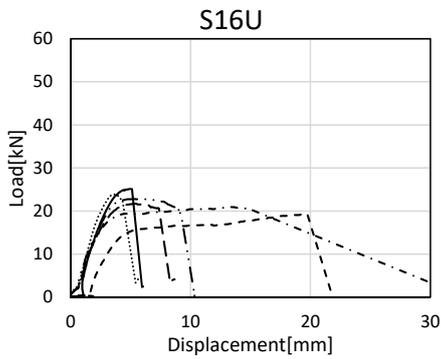
試験体 S16T 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	1.5d	60	391.6	9.83	5.06	22.30	Splitting
E2							320.8	11.27		19.43	Shear
E3							349.8	11.47		21.30	Splitting
E4							403.0	11.44		23.83	Splitting
E5							329.1	11.13		18.57	Splitting
E6							405.4	12.89		22.03	Splitting



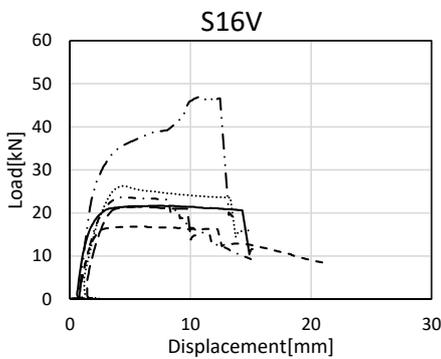
試験体 S16U 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	9d	60	432.6	12.90	5.06	25.13	Splitting
E2							375.0	13.73		19.30	Splitting
E3							454.5	16.39		20.93	Splitting
E4							361.0	11.59		22.80	Splitting
E5							400.3	8.82		23.87	Splitting
E6							386.4	10.73		21.70	Splitting



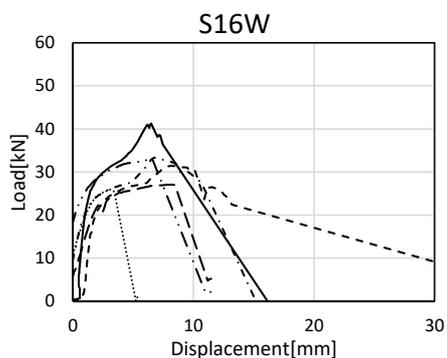
試験体 S16V 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	9d	9d	60	331.6	13.56	4.31	21.70	Splitting
D2							336.5	16.61		16.87	Splitting
D3							363.8	12.30		23.63	Splitting
D4							383.0	9.48		23.83	Splitting
D5							373.0	11.09		18.57	Splitting
D6							364.9	11.63		22.03	Splitting



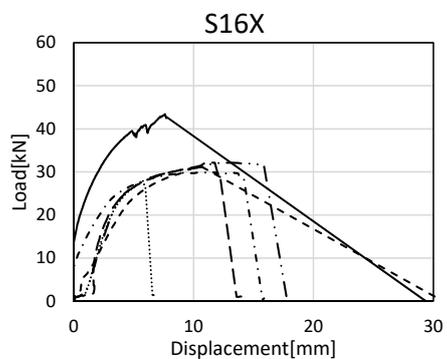
試験体 S16W 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	1.5d	90	429.5	10.37	5.06	41.23	Shear
E2							319.6	10.61		31.43	Shear
E3							368.3	11.18		33.30	Shear
E4							413.9	11.19		33.13	Splitting
E5							309.8	10.67		25.90	Splitting
E6							396.3	12.28		27.03	Splitting



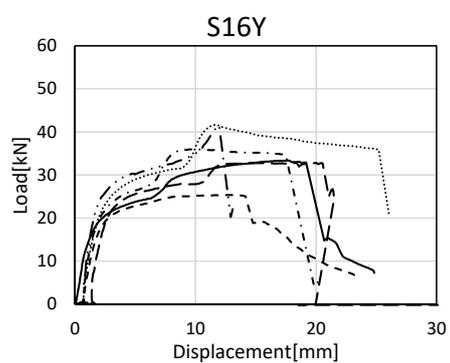
試験体 S16X 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	1.5d	9d	90	438.9	12.06	5.06	43.37	Splitting
E2							383.1	11.87		31.20	Splitting
E3							424.9	17.80		29.93	Splitting
E4							364.5	12.15		32.13	Splitting
E5							370.8	10.80		27.60	Splitting
E6							377.5	12.65		32.23	Splitting



試験体 S16Y 結果一覧

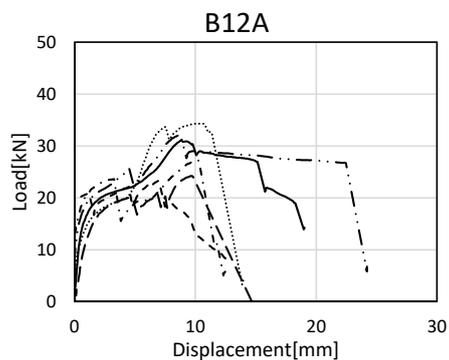
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Japanese cedar (S)	16mm	7d	9d	9d	90	323.2	10.54	4.31	33.33	Splitting
D2							344.6	11.58		25.37	Splitting
D3							332.6	9.14		35.93	Splitting
D4							363.4	10.17		41.53	Splitting
D5							381.1	12.46		41.63	Splitting
D6							388.7	12.63		32.80	Splitting



A-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12mm

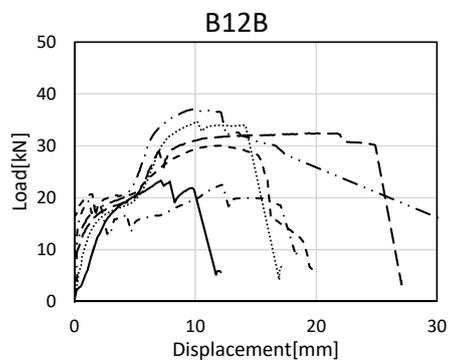
試験体 B12A 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	1.5d	120	679.0	14.43	8.83	32.20	Splitting
A2							564.5	15.13		34.30	Splitting
A3							528.3	14.33		24.20	Splitting
A4							621.1	14.45		31.07	Splitting
A5							696.2	16.65		23.23	Splitting
A6							697.9	15.52		27.27	Splitting



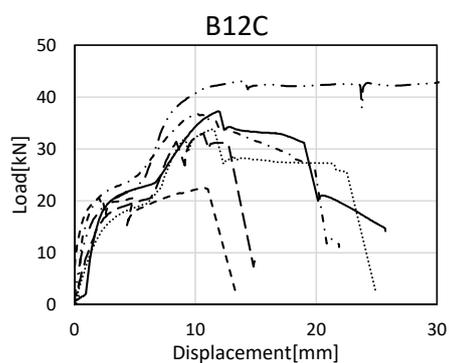
試験体 B12B 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	3d	120	611.9	12.75	8.83	37.03	Splitting
A2							552.7	12.89		34.70	Splitting
A3							580.5	12.37		32.40	Splitting
A4							571.7	13.50		23.33	Splitting
A5							715.1	13.57		30.03	Splitting
A6							687.2	12.74		22.47	Splitting



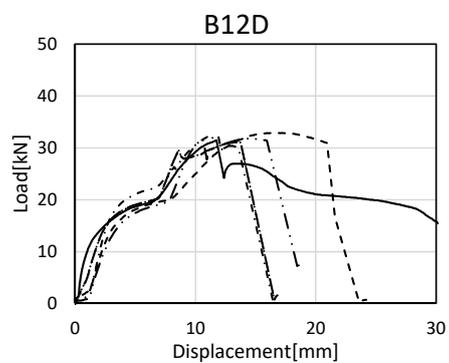
試験体 B12C 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	6d	120	654.1	11.69	8.83	43.20	Splitting
A2							593.5	11.41		33.77	Splitting
A3							534.8	13.27		32.97	Splitting
A4							579.3	11.72		37.23	Splitting
A5							687.8	10.05		22.53	Splitting
A6							694.7	9.96		36.73	Splitting



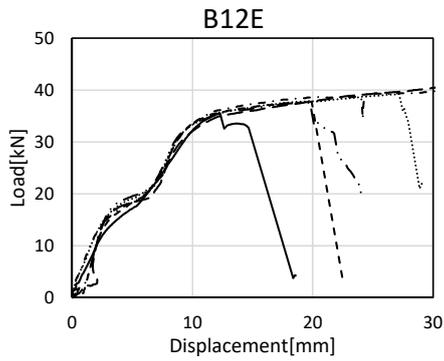
試験体 B12D 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	9d	120	526.9	12.83	6.93	31.80	Splitting
C2							495.7	11.57		31.10	Splitting
C3							507.8	12.45		35.33	Splitting
C4							530.3	11.65		31.43	Splitting
C5							457.7	11.13		32.87	Splitting
C6							583.1	10.72		32.40	Splitting



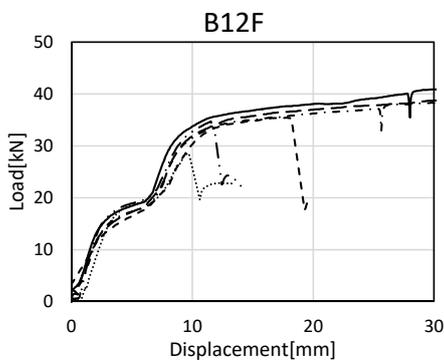
試験体 B12E 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	12mm	7d	3d	9d	120	549.3	13.29	6.84	35.50	Splitting
B2							486.5	12.89		37.73	Splitting
B3							510.6	—		40.90	Splitting
B4							478.3	12.19		37.57	Splitting
B5							491.4	10.02		39.23	Splitting
B6							545.6	10.31		42.93	Splitting



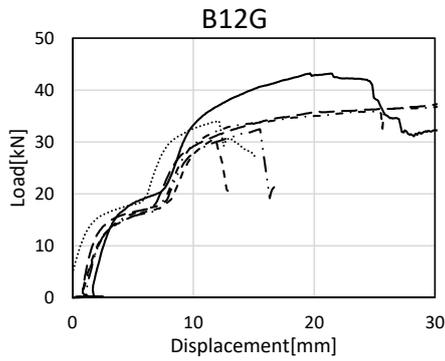
試験体 B12F 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	12mm	7d	6d	9d	120	553.9	9.22	6.84	41.33	Splitting
B2							482.2	6.59		35.43	Splitting
B3							492.2	8.35		38.47	Splitting
B4							473.1	10.66		34.70	Splitting
B5							492.2	12.72		28.53	Splitting
B6							503.0	12.24		39.10	Splitting



試験体 B12G 結果一覧

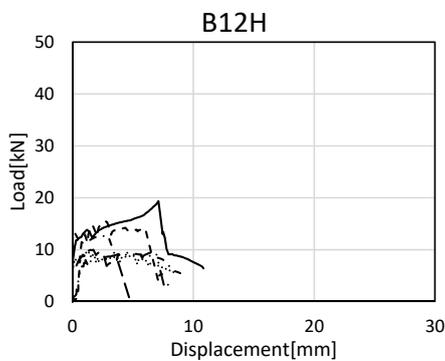
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	12mm	7d	9d	9d	120	581.2	8.21	6.84	43.20	Splitting
B2							492.0	6.41		30.43	Splitting
B3							475.2	7.37		38.33	DP slipping
B4							469.3	9.56		32.43	Splitting
B5							514.7	9.76		34.00	Splitting
B6							511.1	10.51		38.40	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

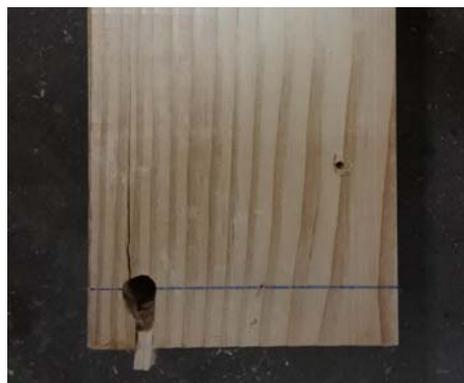
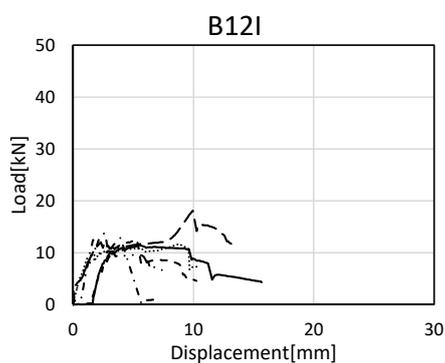
試験体 B12H 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	2d	1.5d	1.5d	120	589.5	11.50	8.83	9.60	Shear
A2							586.0	9.98		9.67	Shear
A3							542.2	10.84		9.97	Shear
A4							577.4	14.83		19.33	Shear
A5							683.6	13.80		15.40	Shear
A6							704.7	12.91		13.20	Shear



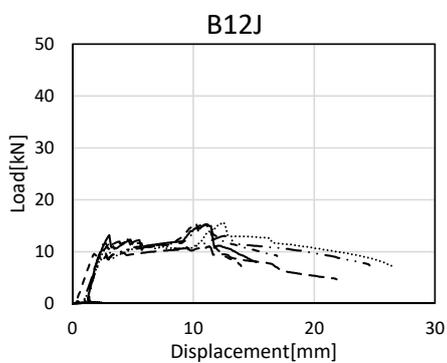
試験体 B12I 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	12mm	2d	1.5d	9d	120	490.9	13.50	6.93	10.43	Shear
C2							488.6	12.92		11.67	Shear
C3							465.3	13.98		18.10	Shear
C4							484.6	10.39		11.37	Shear
C5							444.7	13.52		12.53	Shear
C6							611.8	10.81		13.70	Shear



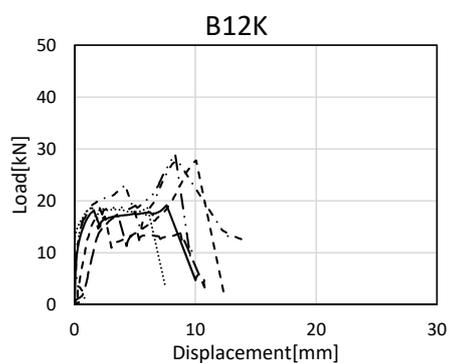
試験体 B12J 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	12mm	2d	9d	9d	120	442.2	11.94	6.67	15.27	Shear
D2							428.4	10.10		15.43	Shear
D3							517.4	10.53		15.03	Shear
D4							515.5	13.26		13.03	Shear
D5							502.8	13.65		15.63	Shear
D6							474.8	13.81		11.13	Shear



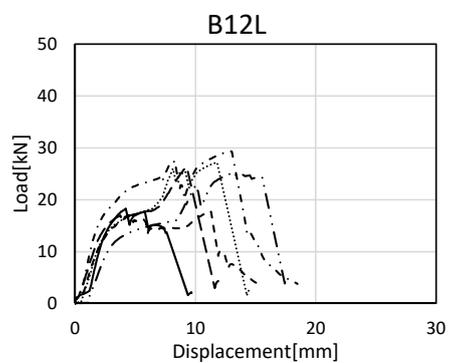
試験体 B12K 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	4d	1.5d	1.5d	120	635.3	13.12	8.83	29.00	Shear
A2							545.7	11.72		18.87	Splitting
A3							554.2	11.68		17.43	Splitting
A4							558.3	15.22		19.13	Splitting
A5							674.2	15.16		27.80	Shear
A6							678.4	16.28		27.70	Shear



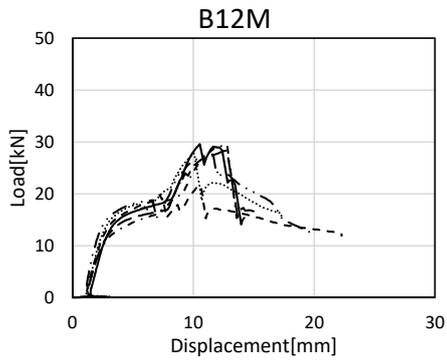
試験体 B12L 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	12mm	4d	1.5d	9d	120	496.6	11.53	6.93	25.30	Shear
C2							484.1	9.67		27.20	Splitting
C3							470.2	9.88		26.30	Shear
C4							504.9	13.60		18.30	Splitting
C5							442.7	12.17		17.67	Splitting
C6							575.3	12.00		29.33	Splitting



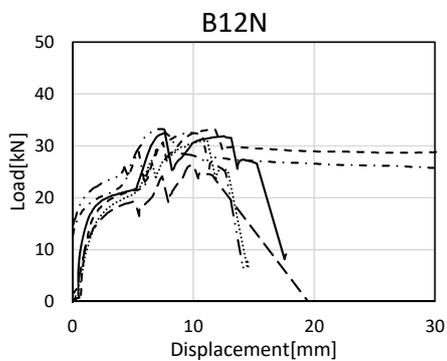
試験体 B12M 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	12mm	4d	9d	9d	120	519.4	9.06	6.84	29.60	Shear
B2							488.6	6.56		21.53	Shear
B3							507.8	7.82		29.47	Splitting
B4							519.3	13.90		27.60	Shear
B5							525.0	13.56		27.80	Shear
B6							497.0	15.46		28.30	Shear



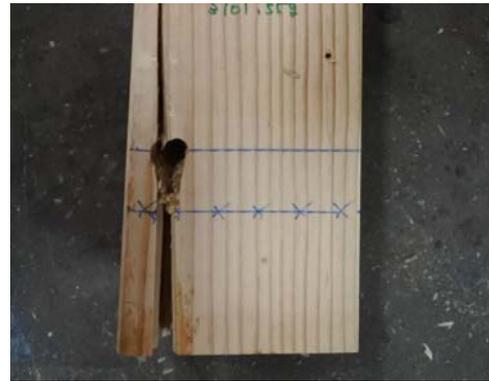
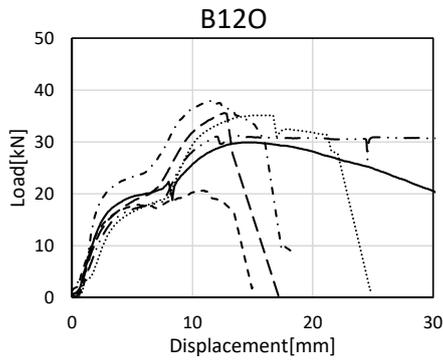
試験体 B12N 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	12mm	10d	1.5d	1.5d	120	703.1	14.17	8.83	33.20	Splitting
A2							591.9	13.82		31.07	Splitting
A3							534.6	13.83		26.27	Splitting
A4							575.9	14.69		32.53	Splitting
A5							699.7	15.70		33.20	Splitting
A6							686.5	14.72		32.67	Splitting



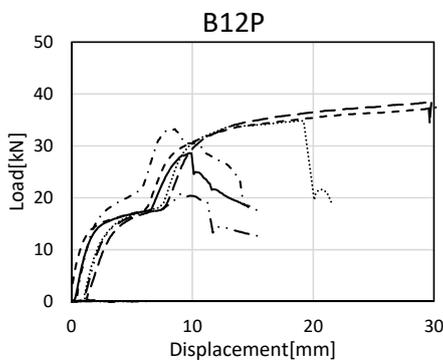
試験体 B12O 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	12mm	10d	1.5d	9d	120	512.8	10.20	6.93	31.17	Splitting
C2							486.1	8.16		35.17	Splitting
C3							481.1	8.33		35.57	Splitting
C4							499.1	10.81		29.90	Splitting
C5							447.7	8.03		20.67	Splitting
C6							572.2	7.71		37.97	Splitting



試験体 B12P 結果一覧

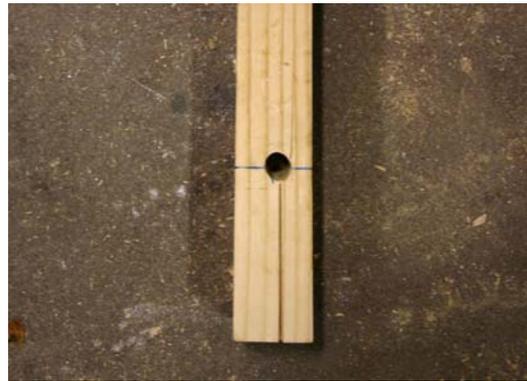
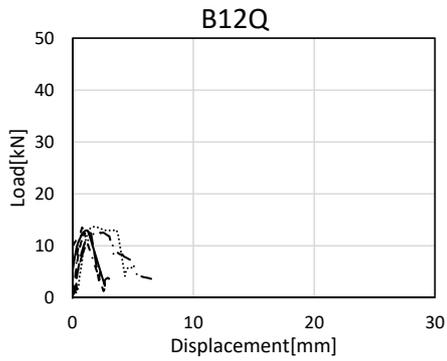
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	10d	9d	9d	120	480.9	14.36	6.92	28.57	Splitting
E2							452.2	12.22		38.13	Splitting
E3							489.1	12.91		33.20	Splitting
E4							529.9	9.65		20.80	Splitting
E5							513.0	7.20		34.80	Splitting
E6							472.0	8.32		40.60	DP slipping



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

試験体 B12Q 結果一覧

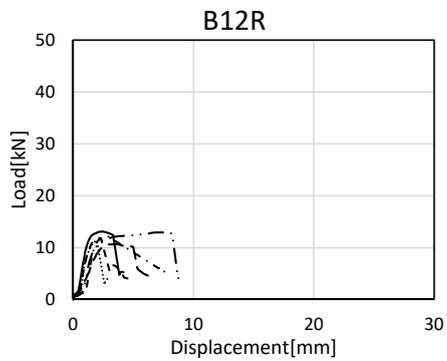
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	1.5d	30	492.6	12.78	6.92	12.97	Splitting
E2							555.6	12.37		12.47	Jig failure
E3							506.1	11.53		13.50	Splitting
E4							487.5	12.12		12.83	Splitting
E5							603.3	13.07		13.67	Splitting
E6							519.4	12.73		12.47	Splitting



※Jig failure は試験中に加力治具が破壊し、荷重が低下したことを表す。

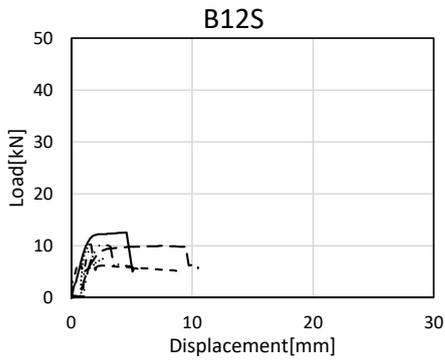
試験体 B12R 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	9d	30	510.2	14.60	6.92	13.10	Splitting
E2							519.7	13.55		11.83	Splitting
E3							494.0	12.32		12.20	Splitting
E4							515.5	12.60		12.93	Splitting
E5							555.4	11.28		11.37	Splitting
E6							450.9	12.32		10.67	Splitting



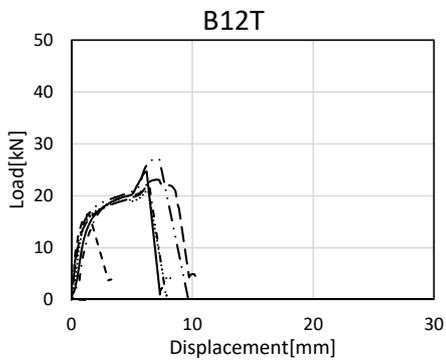
試験体 B12S 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	9d	9d	30	499.4	13.05	6.92	12.53	Splitting
E2							506.2	12.85		6.77	Splitting
E3							501.0	12.72		10.20	Splitting
E4							549.6	12.61		10.17	Splitting
E5							565.9	13.18		10.57	Splitting
E6							454.9	14.12		9.97	Splitting



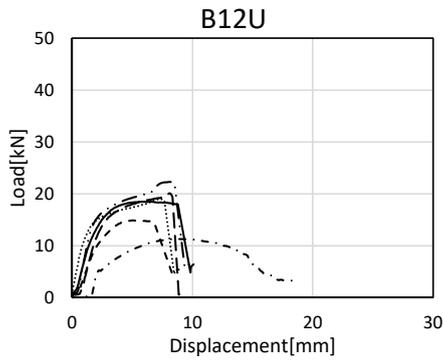
試験体 B12T 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	1.5d	60	505.0	13.33	6.92	24.67	Splitting
E2							438.5	12.30		16.57	Splitting
E3							457.9	12.47		22.40	Splitting
E4							577.4	12.80		27.13	Splitting
E5							577.6	13.72		21.03	Splitting
E6							504.1	14.05		23.10	Splitting



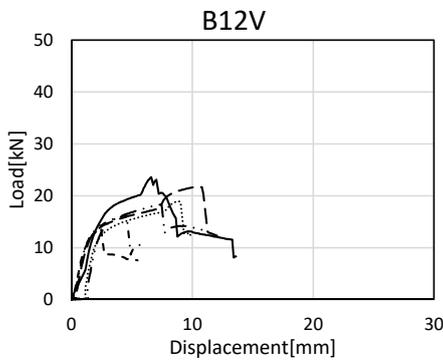
試験体 B12U 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	9d	60	480.1	16.52	6.92	18.47	Splitting
E2							422.3	15.62		14.83	Splitting
E3							474.9	14.31		11.30	Splitting
E4							515.5	13.56		22.27	Splitting
E5							484.1	12.45		18.97	Splitting
E6							500.6	11.66		20.13	Splitting



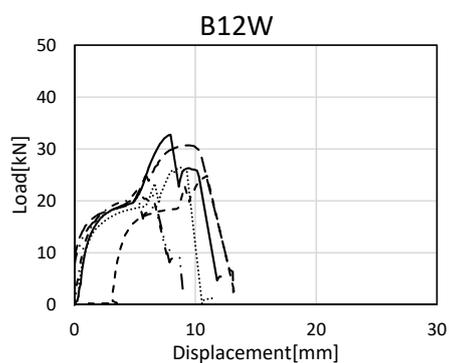
試験体 B12V 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	9d	9d	60	484.1	14.44	6.92	23.57	Splitting
E2							412.6	13.71		13.83	Splitting
E3							475.9	13.69		16.30	Splitting
E4							526.6	13.82		27.13	Splitting
E5							503.0	13.99		21.03	Splitting
E6							477.5	15.24		23.10	Splitting



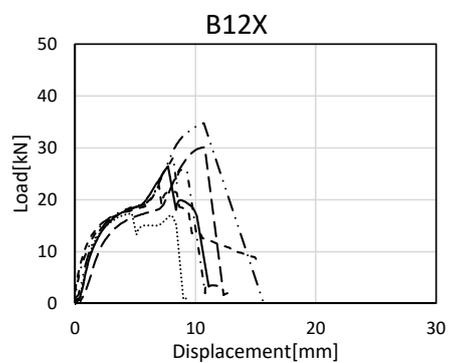
試験体 B12W 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	1.5d	90	512.8	13.97	6.92	32.73	Splitting
E2							498.3	13.15		24.80	Splitting
E3							493.5	12.80		22.70	Splitting
E4							524.2	13.10		20.83	Splitting
E5							567.4	13.83		26.40	Splitting
E6							557.4	13.92		30.70	Splitting



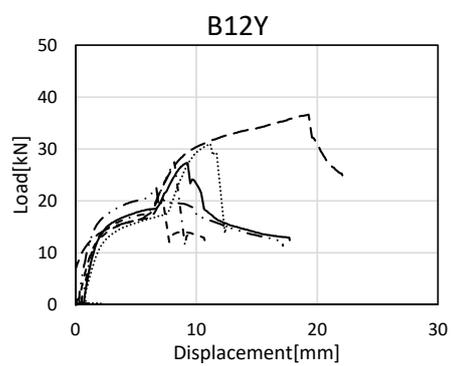
試験体 B12X 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	1.5d	9d	90	516.5	14.00	6.92	26.47	Splitting
E2							453.4	11.67		22.77	Splitting
E3							477.6	10.91		28.13	Splitting
E4							527.3	13.83		34.77	Splitting
E5							488.9	13.47		17.37	Splitting
E6							457.9	14.34		30.10	Splitting



試験体 B12Y 結果一覧

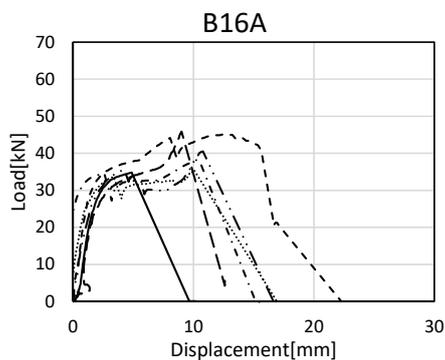
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	12mm	7d	9d	9d	90	487.0	12.39	6.92	27.30	Splitting
E2							456.0	9.89		20.43	Splitting
E3							497.4	9.31		27.43	Splitting
E4							527.2	9.99		22.47	Splitting
E5							514.6	9.30		31.00	Splitting
E6							502.4	10.52		36.60	Splitting



A-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16mm

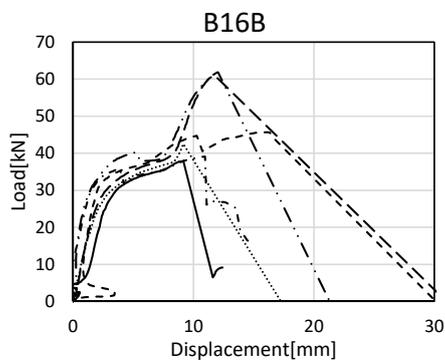
試験体 B16A 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	1.5d	120	594.4	15.05	8.83	40.50	Splitting
A2							562.9	15.29		35.47	Splitting
A3							544.2	15.38		45.90	Splitting
A4							563.8	15.66		34.80	Splitting
A5							680.9	15.05		45.03	Splitting
A6							689.4	16.09		38.23	Splitting



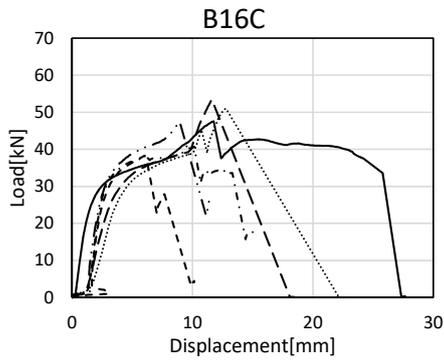
試験体 B16B 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	3d	120	626.5	13.77	8.83	61.83	Splitting
A2							546.9	13.93		42.57	Splitting
A3							576.3	14.18		61.07	Splitting
A4							549.7	10.78		37.97	Splitting
A5							691.4	10.55		45.70	Splitting
A6							683.5	13.06		39.10	Splitting



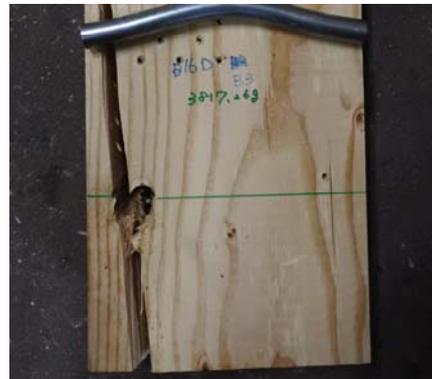
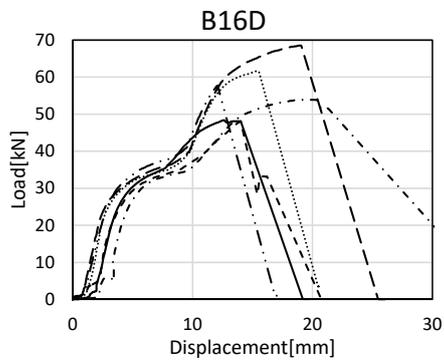
試験体 B16C 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	6d	120	666.8	9.39	8.83	47.40	Splitting
A2							583.8	9.32		51.00	Splitting
A3							536.5	9.45		53.43	Splitting
A4							580.6	11.70		47.57	Splitting
A5							680.0	9.02		38.27	Splitting
A6							665.2	8.98		40.73	Splitting



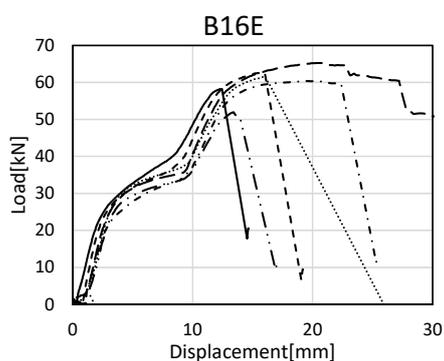
試験体 B16D 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	9d	120	513.7	10.54	6.84	57.73	Splitting
B2							489.9	8.78		61.67	Splitting
B3							483.0	10.62		68.53	Splitting
B4							498.8	11.86		48.37	Splitting
B5							507.8	12.30		48.10	Splitting
B6							507.0	11.96		53.90	Splitting



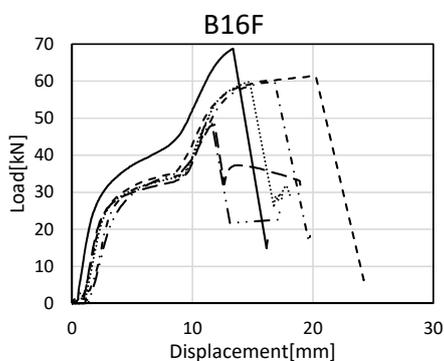
試験体 B16E 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	16mm	7d	3d	9d	120	540.1	11.99	6.84	58.20	Splitting
B2							504.9	10.10		62.70	Splitting
B3							479.5	11.28		60.37	Splitting
B4							493.9	11.93		51.97	Splitting
B5							509.0	11.42		61.53	Splitting
B6							539.8	10.46		65.23	Splitting



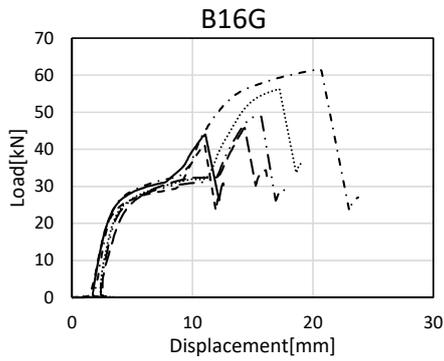
試験体 B16F 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
B1	Douglas fir (B)	16mm	7d	6d	9d	120	523.3	9.29	6.84	68.77	Splitting
B2							499.4	8.83		61.33	Splitting
B3							501.5	9.30		59.77	Splitting
B4							496.6	1.59		50.17	Splitting
B5							516.4	11.60		59.83	Splitting
B6							498.1	11.93		48.23	Splitting



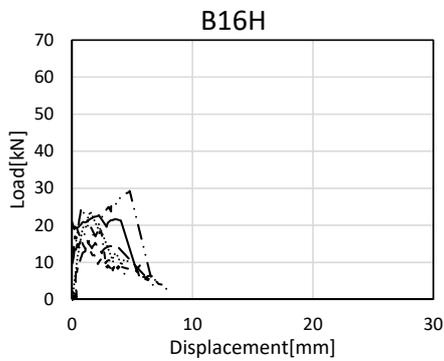
試験体 B16G 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	7d	9d	9d	120	450.4	14.07	6.67	44.03	Splitting
D2							425.5	14.11		41.23	Splitting
D3							516.7	15.10		61.70	Splitting
D4							487.2	11.42		48.93	Splitting
D5							494.6	8.87		56.27	Splitting
D6							498.2	9.63		45.80	Splitting



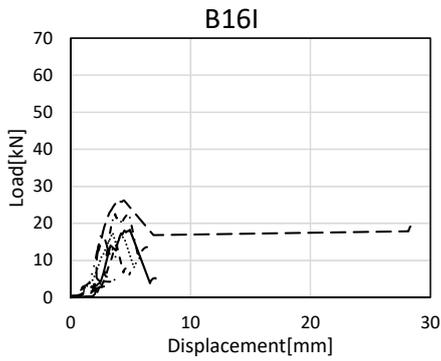
試験体 B16H 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	2d	1.5d	1.5d	120	676.8	14.20	8.83	29.27	Shear
A2							590.1	14.21		23.77	Splitting
A3							599.5	14.07		15.43	Splitting
A4							553.4	15.89		22.73	Shear
A5							680.0	14.82		18.97	Shear
A6							708.2	13.58		18.13	Shear



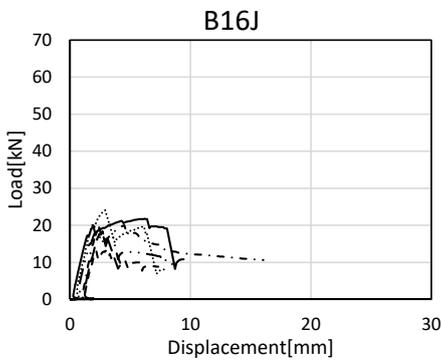
試験体 B16I 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	16mm	2d	1.5d	9d	120	494.6	13.17	6.93	18.13	Shear
C2							470.3	12.62		17.47	Splitting
C3							512.2	11.47		26.20	Shear
C4							498.1	11.52		18.30	Shear
C5							467.3	11.34		14.27	Shear
C6							558.8	11.18		22.83	Shear



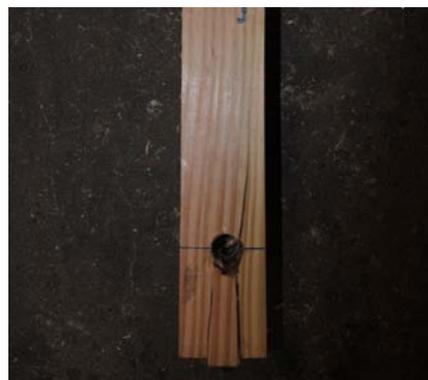
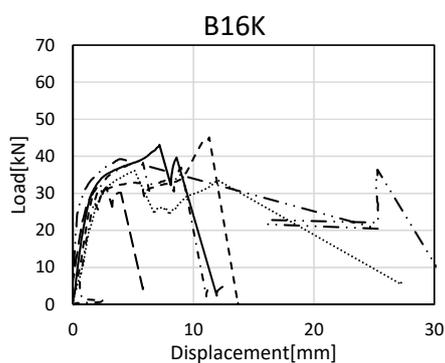
試験体 B16J 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	2d	9d	9d	120	466.2	13.55	6.67	21.77	Shear
D2							424.4	12.34		13.30	Shear
D3							552.3	13.13		20.03	Shear
D4							467.4	11.55		18.10	Shear
D5							483.6	10.12		24.07	Shear
D6							506.5	11.03		18.43	Shear



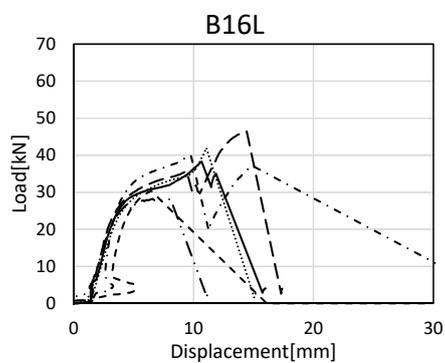
試験体 B16K 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	4d	1.5d	1.5d	120	655.1	14.12	8.83	39.23	Splitting
A2							593.6	13.88		36.10	Splitting
A3							526.6	13.86		31.93	Splitting
A4							590.2	15.35		43.07	Shear
A5							698.3	14.91		45.10	Shear
A6							711.2	14.06		39.03	Shear



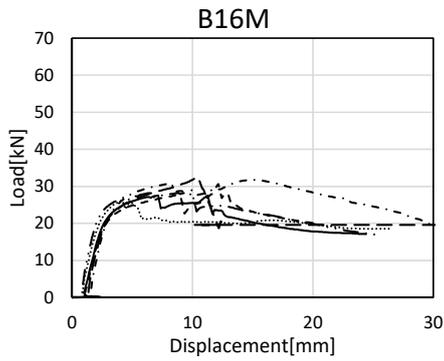
試験体 B16L 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	16mm	4d	1.5d	9d	120	521.2	11.40	6.93	28.23	Splitting
C2							473.5	10.43		41.97	Splitting
C3							500.8	10.31		46.43	Splitting
C4							540.0	15.02		38.30	Splitting
C5							446.3	14.41		30.37	Splitting
C6							593.1	14.61		39.97	Shear



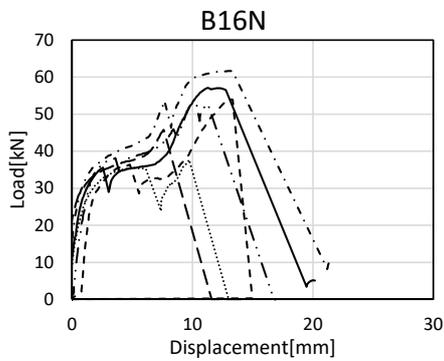
試験体 B16M 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	4d	9d	9d	120	449.4	12.97	6.67	27.53	Shear
D2							411.8	12.07		30.63	Shear
D3							515.7	12.66		31.80	Splitting
D4							482.9	11.03		28.97	Splitting
D5							467.7	8.93		26.17	Splitting
D6							482.2	10.06		32.50	Splitting



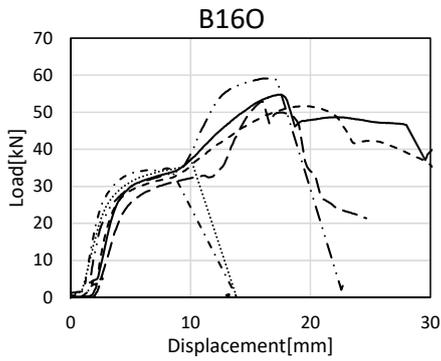
試験体 B16N 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
A1	Douglas fir (B)	16mm	10d	1.5d	1.5d	120	654.0	14.06	8.83	54.13	Splitting
A2							545.6	14.32		37.73	Splitting
A3							526.2	14.26		45.80	Splitting
A4							601.6	12.37		57.13	Splitting
A5							685.5	13.42		53.97	Splitting
A6							722.8	13.85		61.67	Splitting



試験体 B16O 結果一覧

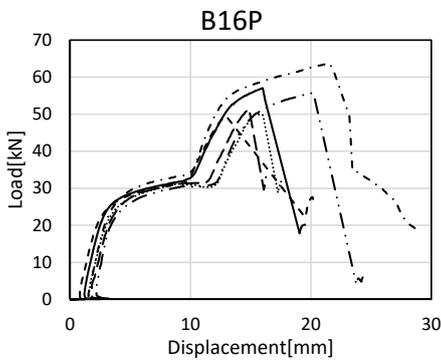
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
C1	Douglas fir (B)	16mm	10d	1.5d	9d	120	499.5	11.94	6.93	59.13	Splitting
C2							477.9	12.26		37.57	Splitting
C3							513.1	12.80		52.83	Splitting
C4							482.4	10.53		54.73	Splitting
C5							451.7	7.54		51.63	DP slipping
C6							561.3	8.03		34.93	Splitting



※DP slipping は試験中にドリフトピンが鋼板から滑落し、荷重が低下したことを表す。

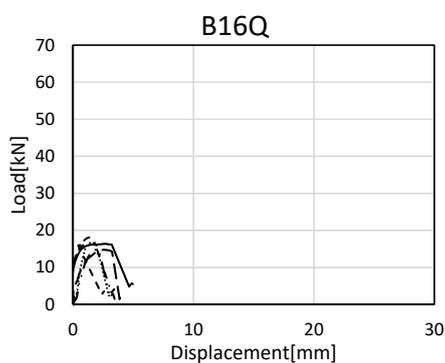
試験体 B16P 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	10d	9d	9d	120	430.7	10.03	6.67	57.00	Splitting
D2							414.3	8.40		49.53	Splitting
D3							526.1	9.59		63.57	Splitting
D4							552.4	23.53		55.67	Splitting
D5							470.2	8.33		50.10	Splitting
D6							483.3	9.70		51.50	Splitting



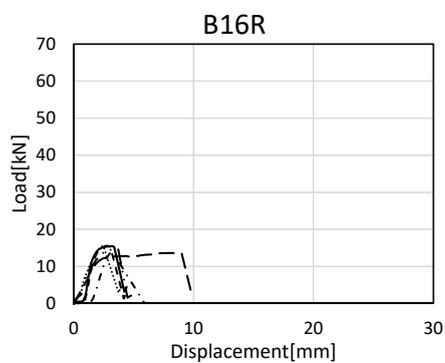
試験体 B16Q 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	1.5d	30	505.7	12.60	6.92	16.40	Splitting
E2							559.2	11.95		16.40	Splitting
E3							523.9	11.97		18.13	Splitting
E4							491.4	13.24		15.00	Splitting
E5							596.1	13.61		16.80	Splitting
E6							527.7	13.33		14.83	Splitting



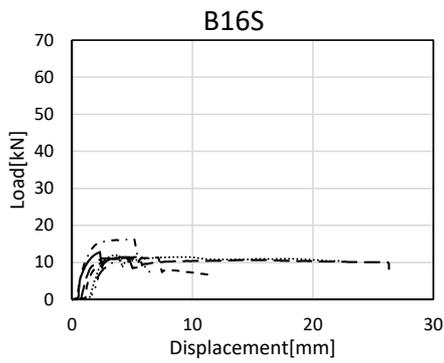
試験体 B16R 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	9d	30	500.1	9.65	6.92	15.43	Splitting
E2							531.1	10.36		15.60	Splitting
E3							494.1	11.62		14.00	Splitting
E4							513.6	12.64		14.80	Splitting
E5							584.0	11.79		15.53	Splitting
E6							439.2	12.96		13.63	Splitting



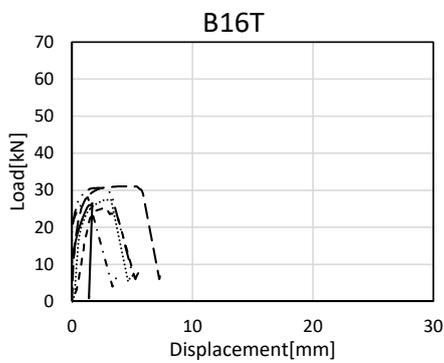
試験体 B16S 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	7d	9d	9d	30	483.6	13.00	6.67	12.83	Splitting
D2							415.0	13.44		11.33	Splitting
D3							543.6	12.24		16.27	Splitting
D4							496.3	12.34		10.50	Splitting
D5							493.7	11.47		12.00	Splitting
D6							478.2	12.01		11.47	Splitting



試験体 B16T 結果一覧

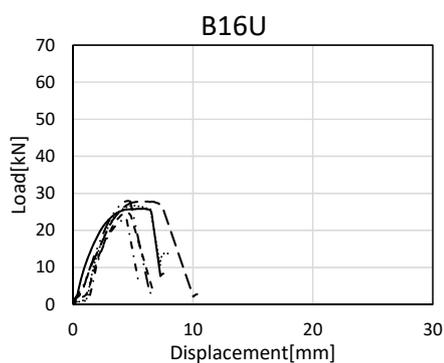
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	1.5d	60	543.4	12.63	6.92	26.53	Jig failure
E2							455.5	12.32		25.33	Splitting
E3							505.5	12.33		28.13	Splitting
E4							532.0	14.18		30.67	Splitting
E5							562.1	14.34		27.57	Splitting
E6							514.0	14.77		31.10	Splitting



※Jig failure は試験中に加力治具が破壊し、荷重が低下したことを表す。

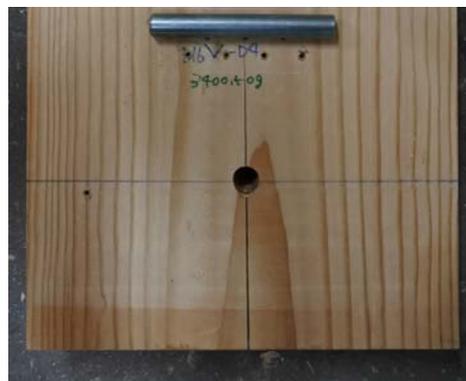
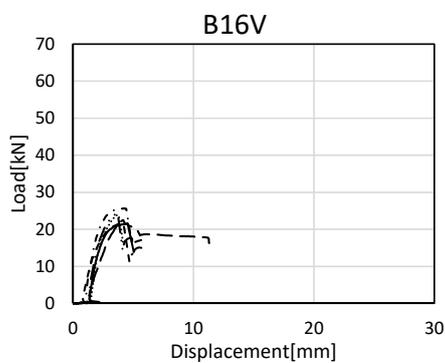
試験体 B16U 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	9d	60	471.1	9.86	6.92	25.87	Splitting
E2							422.5	11.67		24.90	Splitting
E3							460.7	11.27		23.37	Splitting
E4							538.1	12.73		27.97	Splitting
E5							506.3	13.00		26.70	Splitting
E6							469.0	13.85		27.77	Splitting



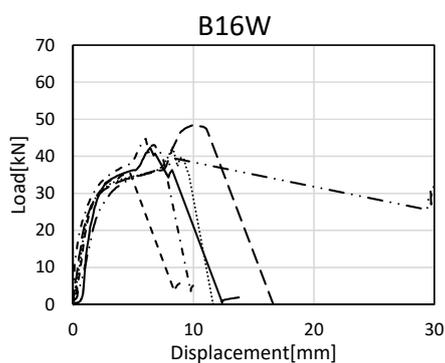
試験体 B16V 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	7d	9d	9d	60	464.6	13.32	6.67	21.60	Splitting
D2							423.6	12.49		21.70	Splitting
D3							538.8	14.87		25.67	Splitting
D4							502.0	11.78		30.67	Splitting
D5							503.8	11.61		27.57	Splitting
D6							498.2	13.14		31.10	Splitting



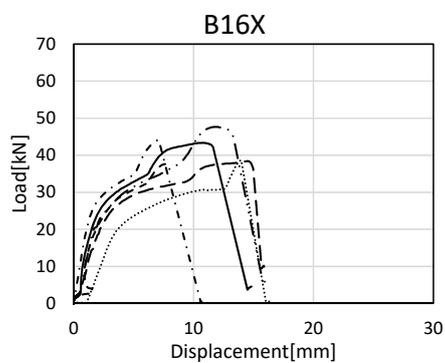
試験体 B16W 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	1.5d	90	511.1	13.00	6.92	42.30	Splitting
E2							481.8	11.95		35.63	Splitting
E3							530.1	12.29		44.77	Splitting
E4							494.8	13.66		39.43	Splitting
E5							557.9	13.78		42.57	Splitting
E6							518.0	13.97		48.43	Shear



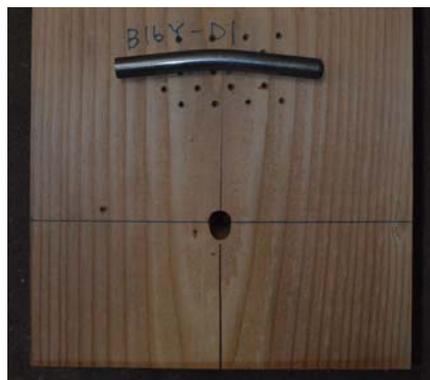
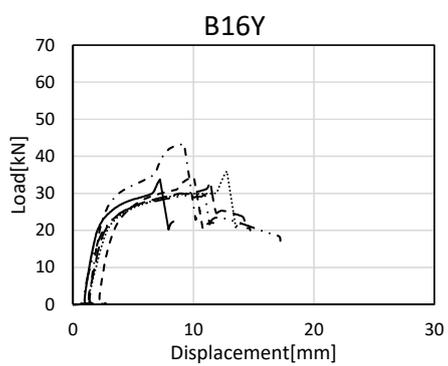
試験体 B16X 結果一覧

Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
E1	Douglas fir (B)	16mm	7d	1.5d	9d	90	473.8	12.52	6.92	43.37	Splitting
E2							446.5	11.62		37.67	Splitting
E3							483.2	10.52		44.20	Splitting
E4							523.5	14.24		47.63	Splitting
E5							511.5	14.38		38.67	Splitting
E6							459.3	14.70		38.43	Splitting



試験体 B16Y 結果一覧

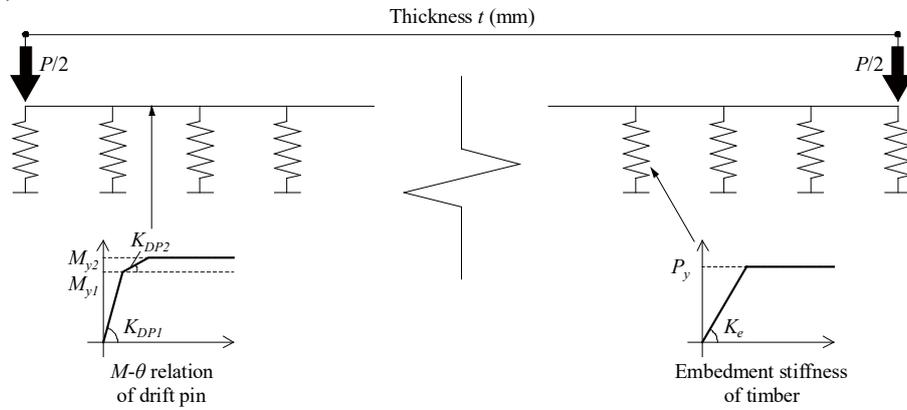
Series	Wood species	Diameter of drift pin	End margin	Edge margin		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)	Average Young's modulus (kN/mm ²)	Splitting strength (kN)	Failure mode
				1	2						
D1	Douglas fir (B)	16mm	7d	9d	9d	90	430.7	11.67	6.67	33.73	Splitting
D2							421.0	10.88		34.40	Splitting
D3							554.8	8.60		43.37	Splitting
D4							492.4	14.38		29.80	Splitting
D5							478.5	14.54		35.97	Splitting
D6							476.4	15.04		33.07	Splitting



B) 縦割裂試験 解析結果一覧

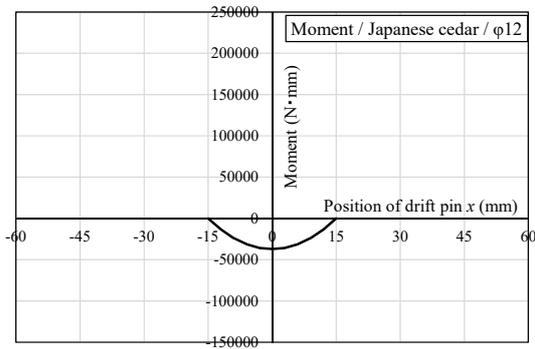
B-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12

S12Qの解析

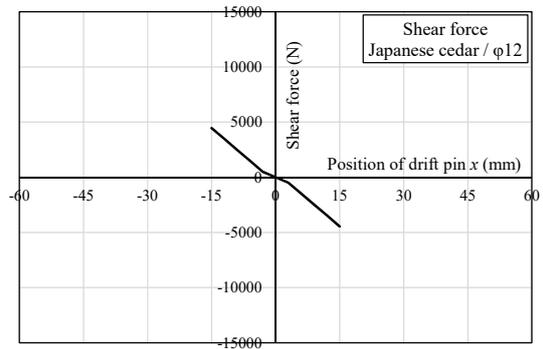


Wood species	Timber				Drift pin				
	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	30	587.3	329.8	9.89	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

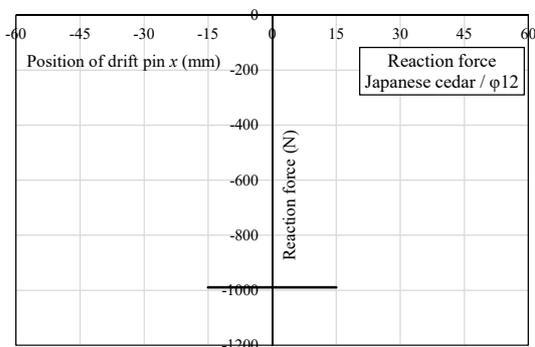
解析モデル図



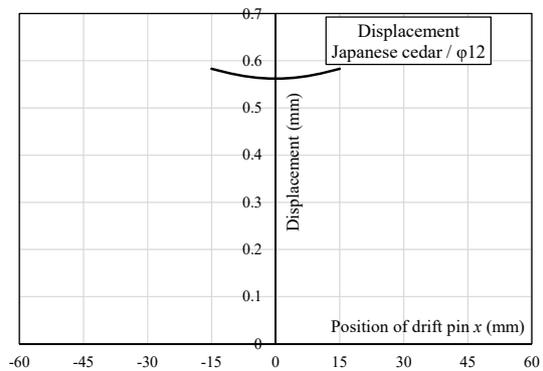
モーメント図



せん断力図

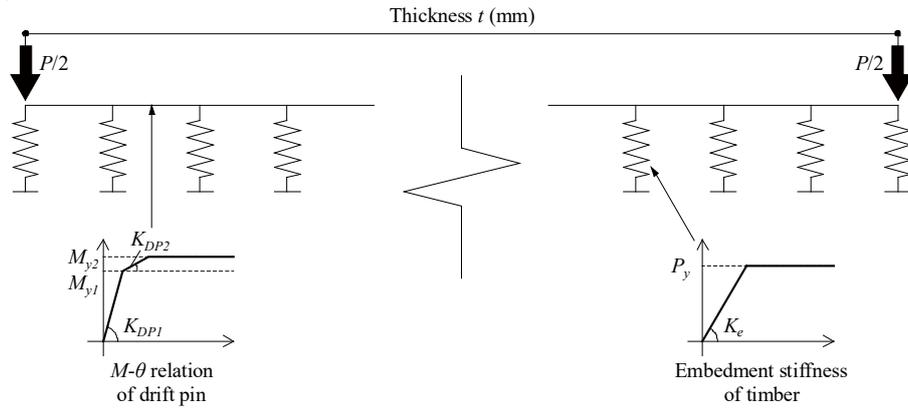


反力図



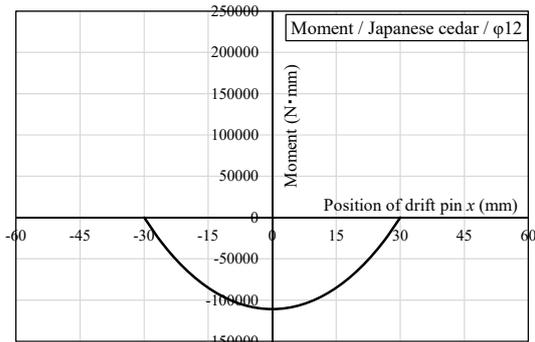
変位図

S12T の解析

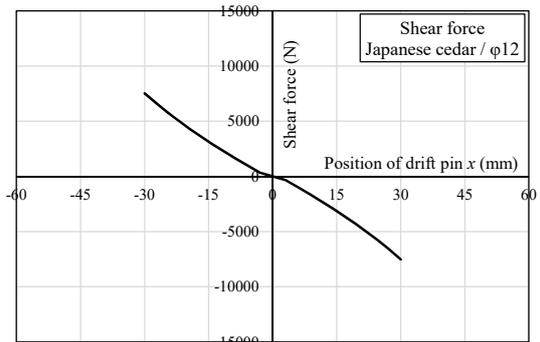


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	60	587.3	329.8	16.04	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

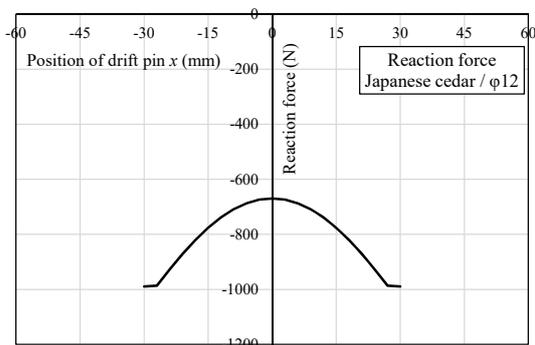
解析モデル図



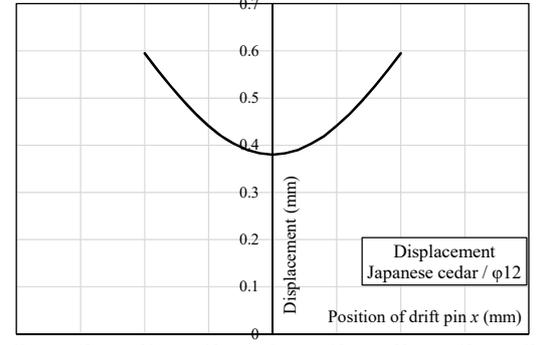
モーメント図



せん断力図

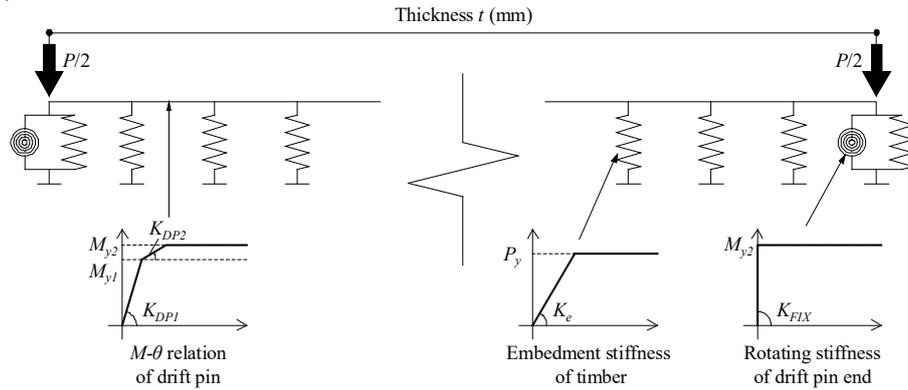


反力図



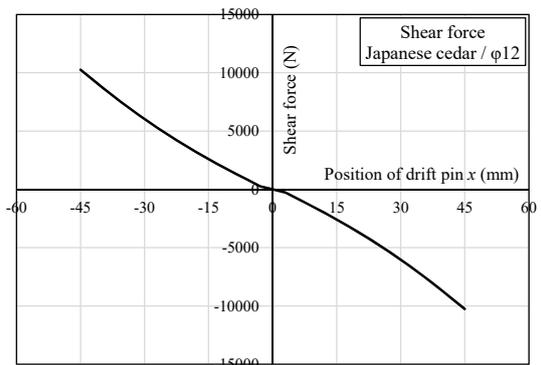
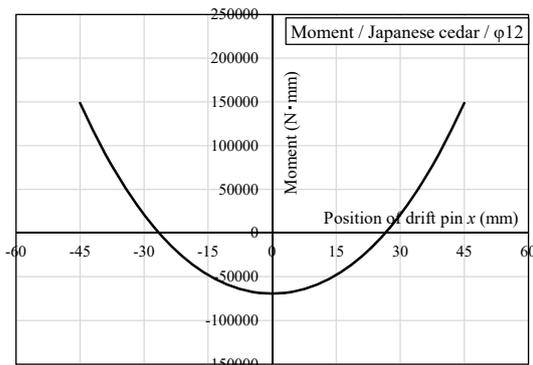
変位図

S12W の解析



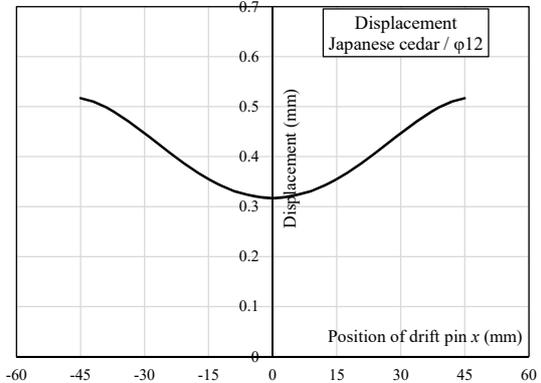
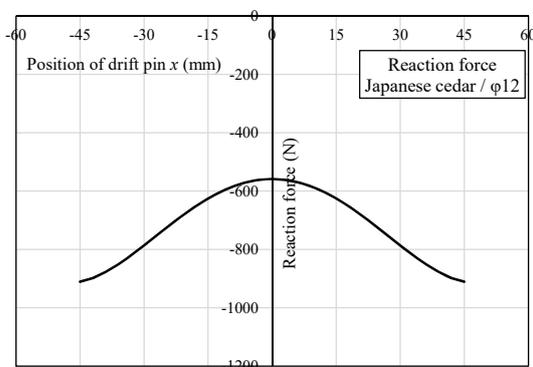
Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	90	587.3	329.8	21.43	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

解析モデル図



モーメント図

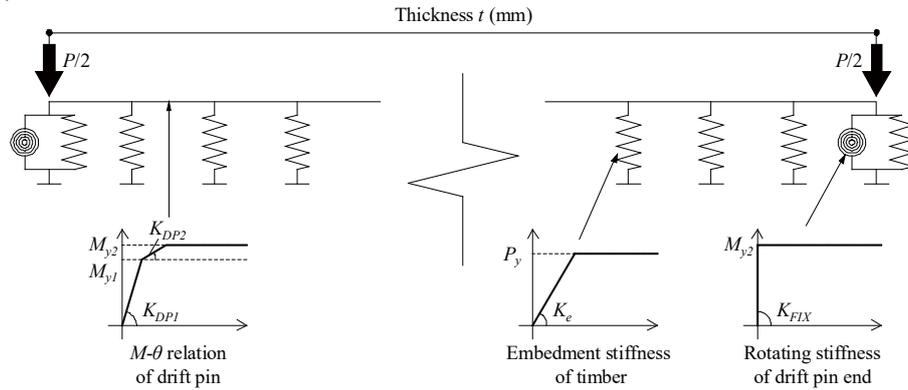
せん断力図



反力図

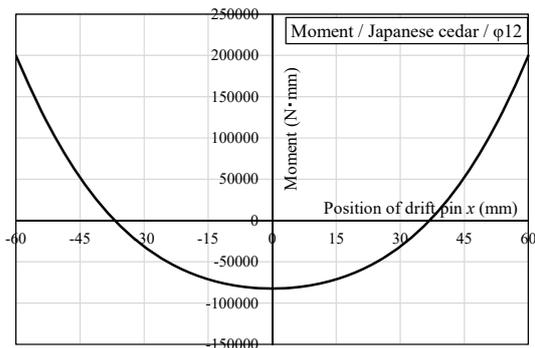
変位図

S12A の解析

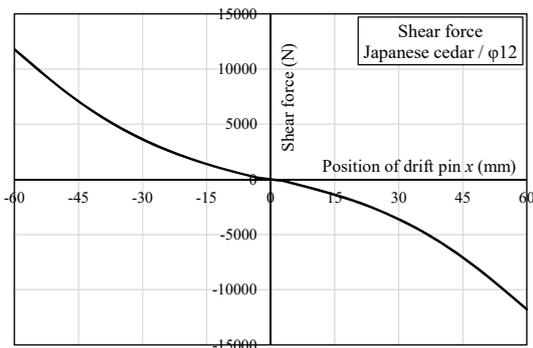


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	120	587.3	329.8	24.57	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

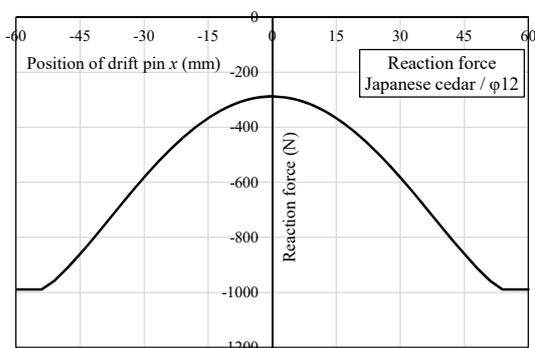
解析モデル図



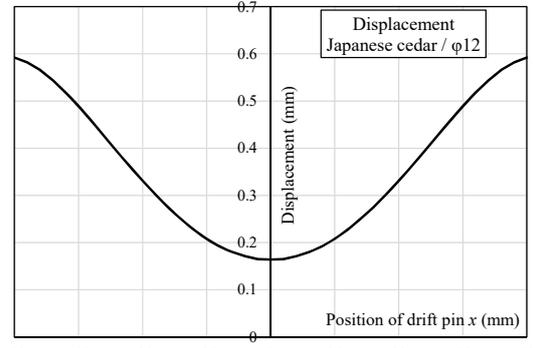
モーメント図



せん断力図

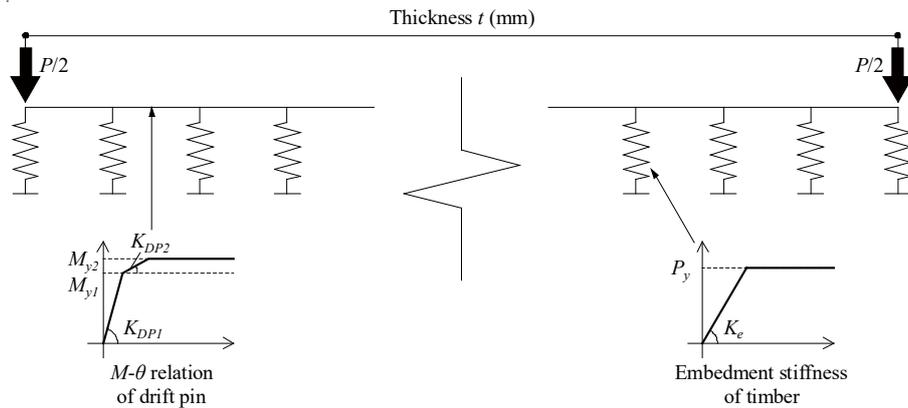


反力図



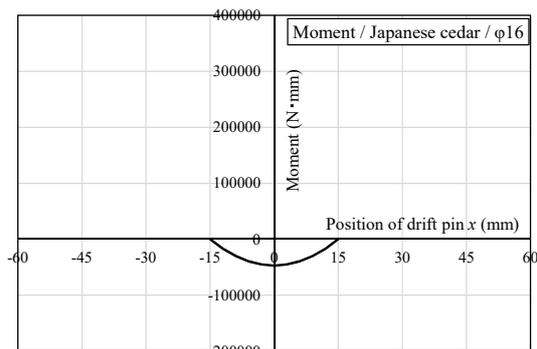
変位図

B-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16
S16Qの解析

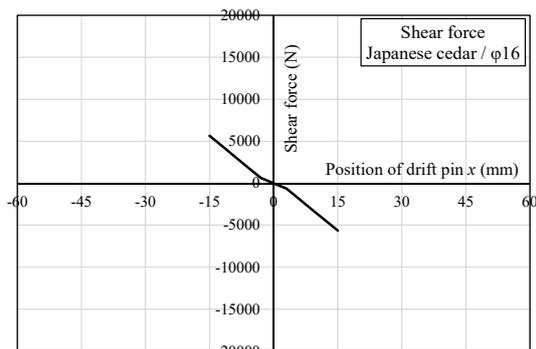


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	30	587.3	418.1	12.54	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

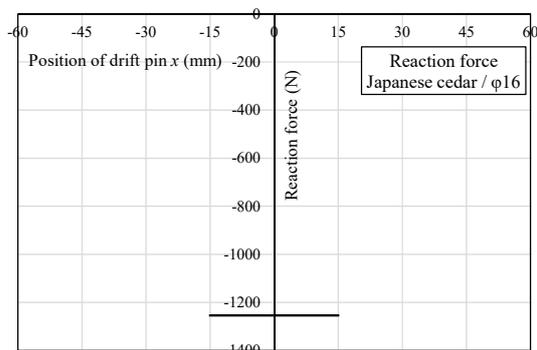
解析モデル図



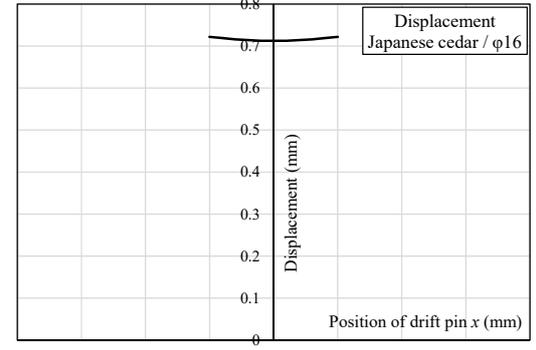
モーメント図



せん断力図

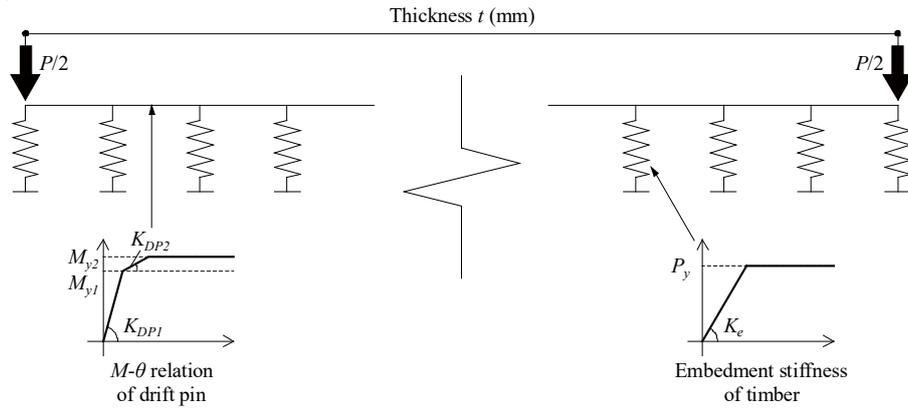


反力図



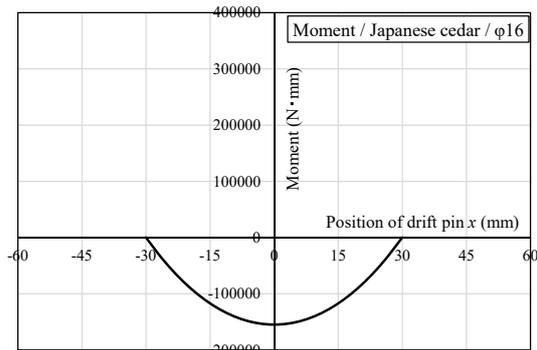
変位図

S16T の解析

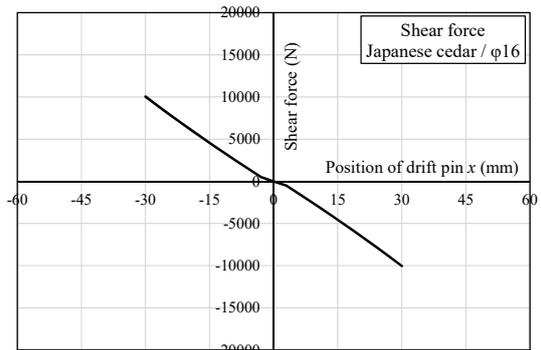


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	60	587.3	418.1	21.24	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

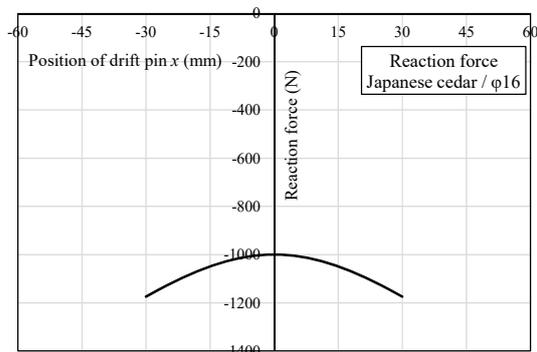
解析モデル図



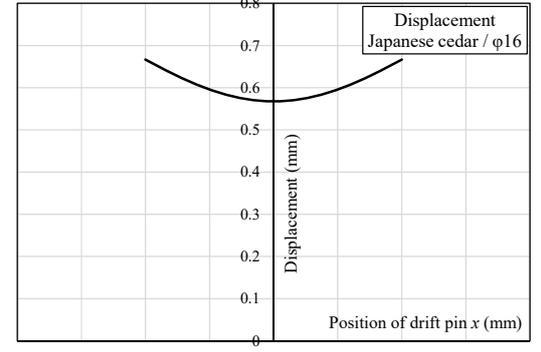
モーメント図



せん断力図

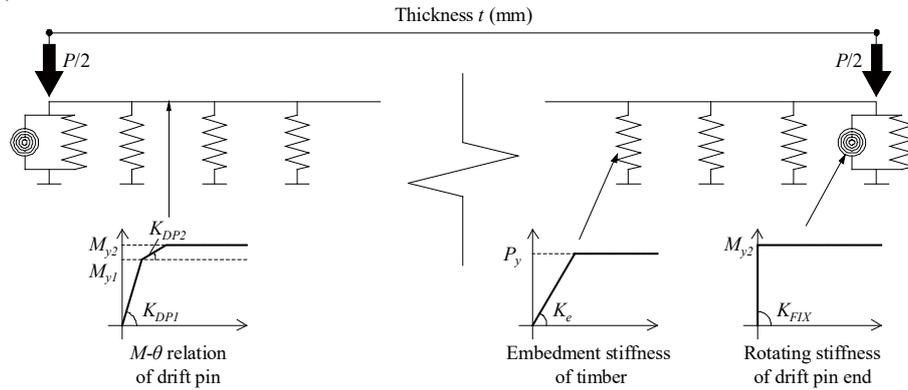


反力図



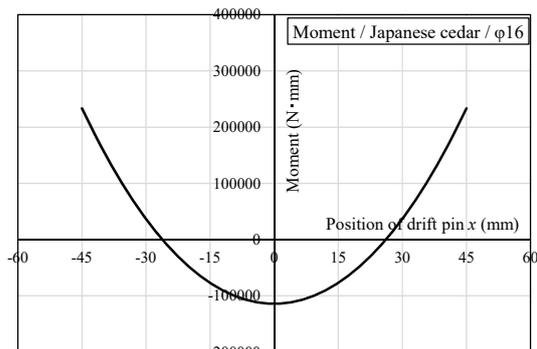
変位図

S16W の解析

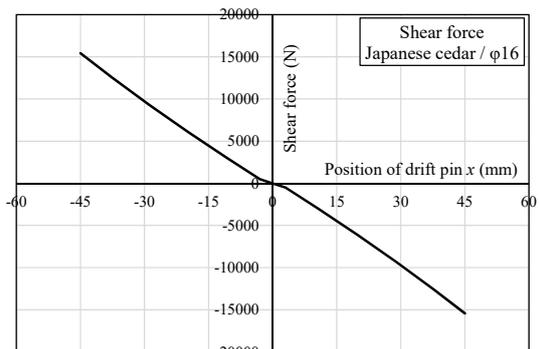


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	90	587.3	418.1	32.00	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

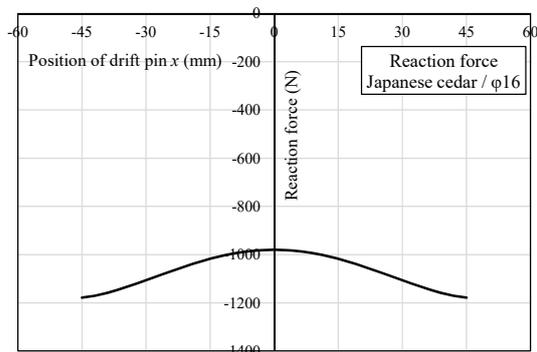
解析モデル図



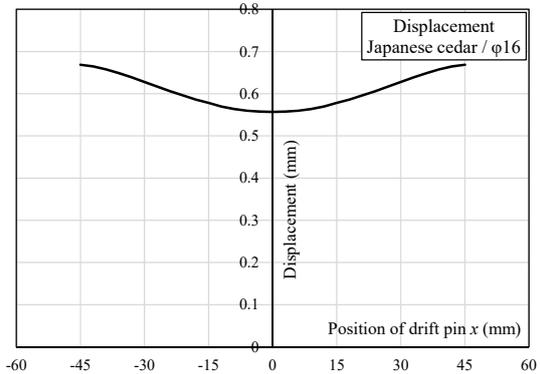
モーメント図



せん断力図

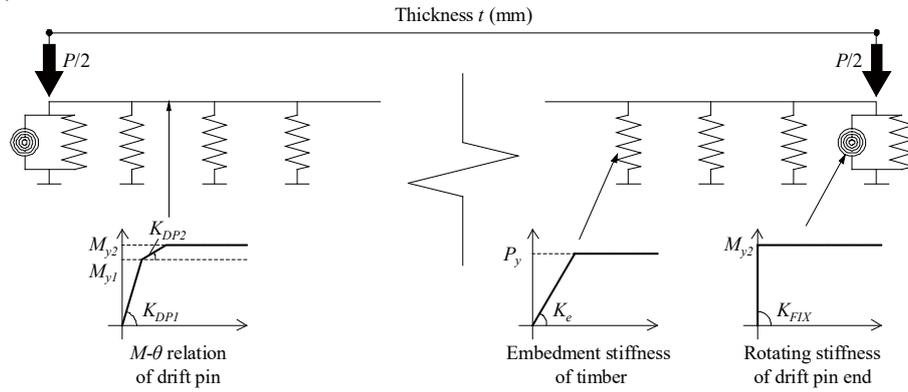


反力図



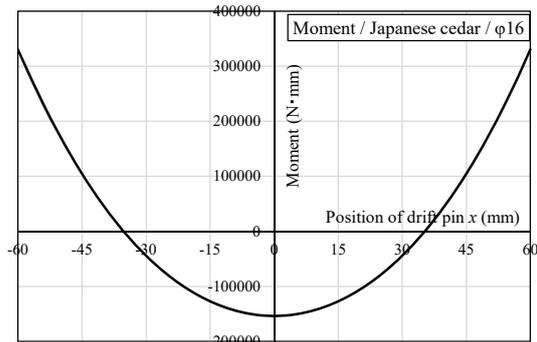
変位図

S16A の解析

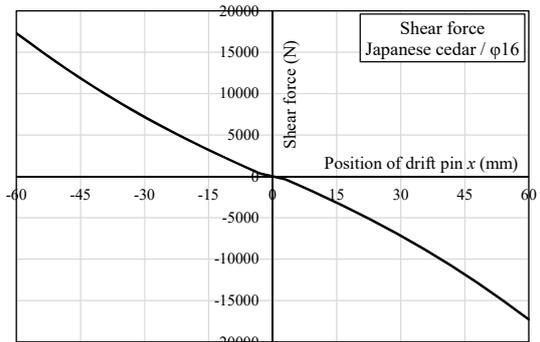


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	120	587.3	418.1	35.71	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

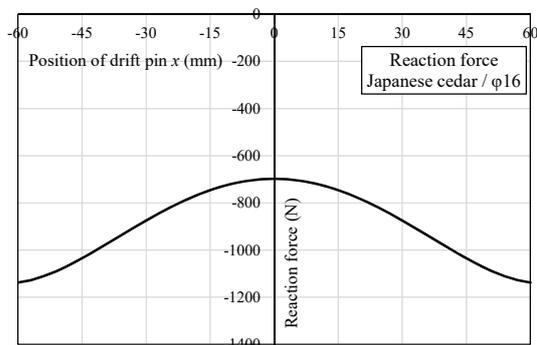
解析モデル図



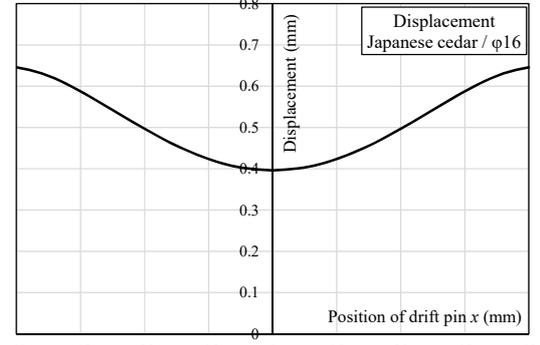
モーメント図



せん断力図



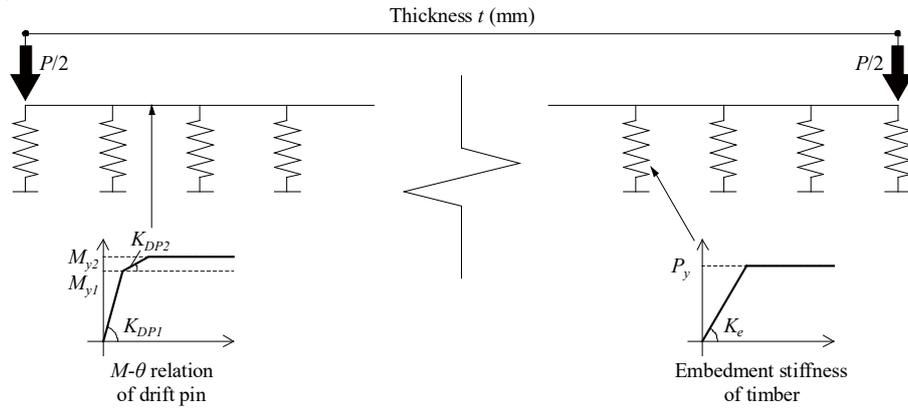
反力図



変位図

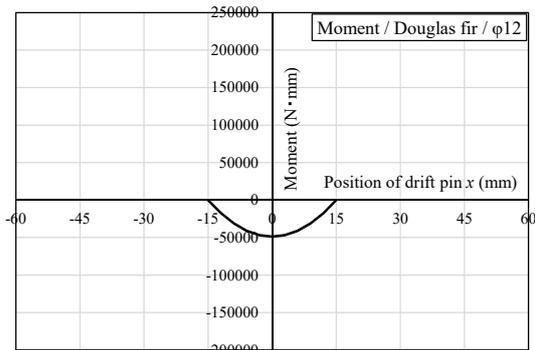
B-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12

B12Qの解析

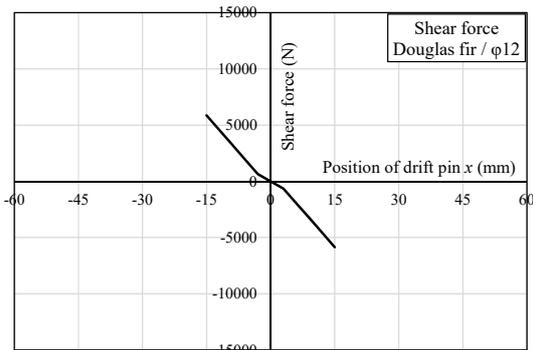


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	30	910.7	432.8	12.99	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

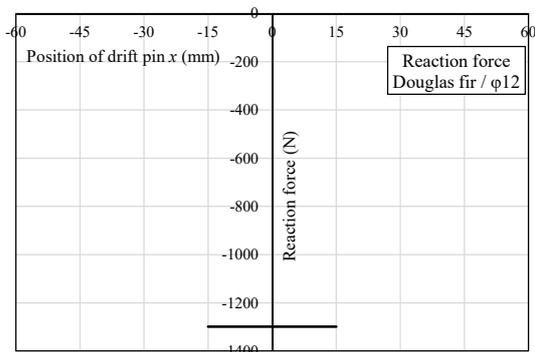
解析モデル図



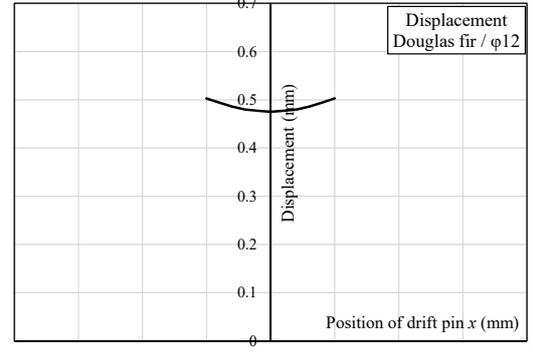
モーメント図



せん断力図

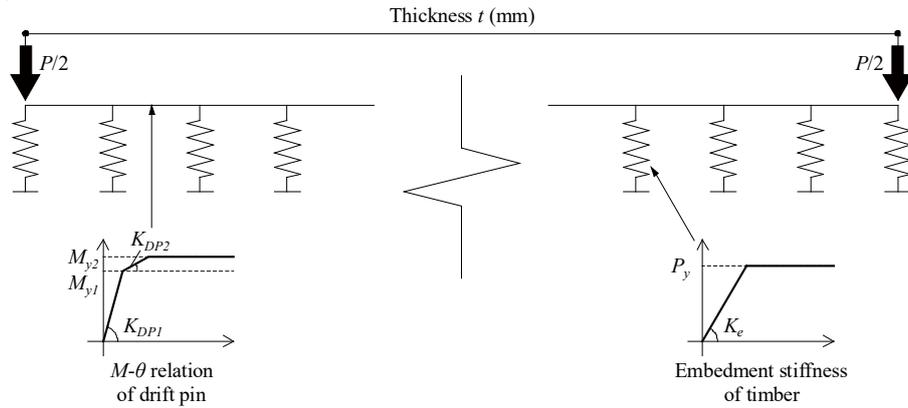


反力図



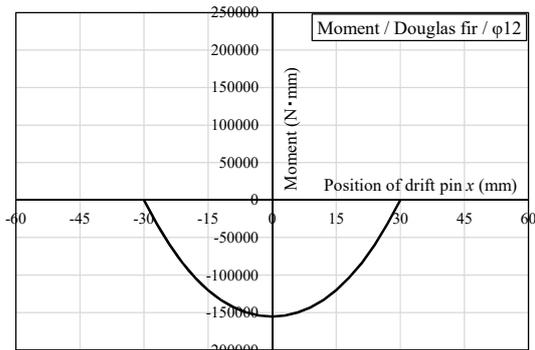
変位図

B12T の解析

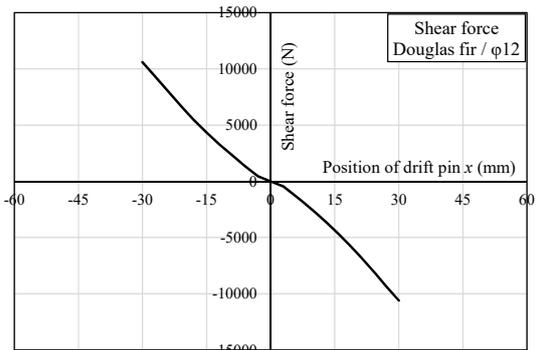


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	60	910.7	432.8	22.48	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

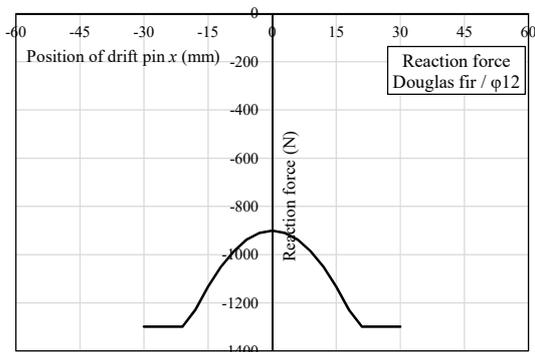
解析モデル図



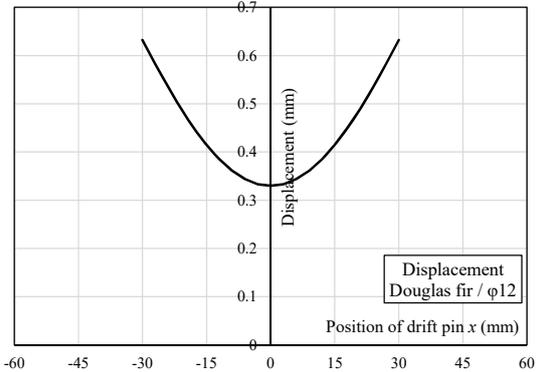
モーメント図



せん断力図

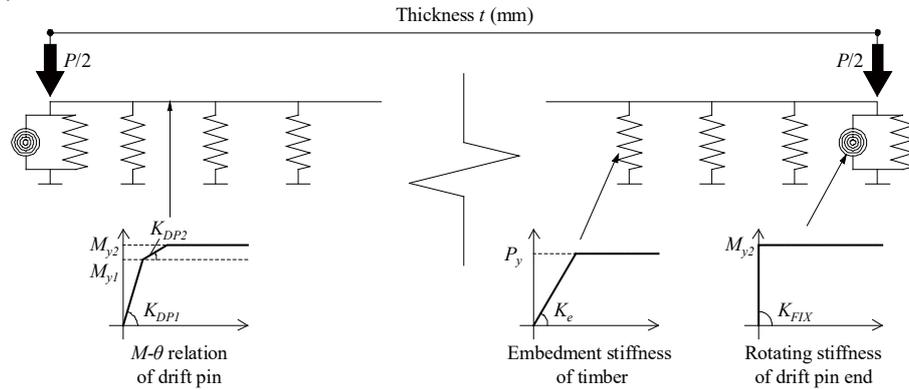


反力図



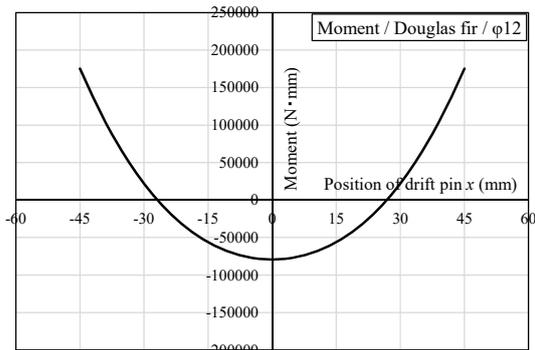
変位図

B12W の解析

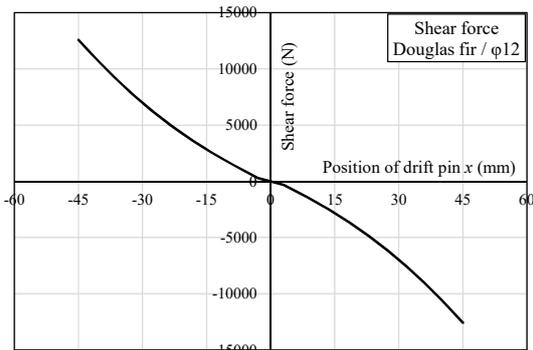


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	90	910.7	432.8	26.36	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

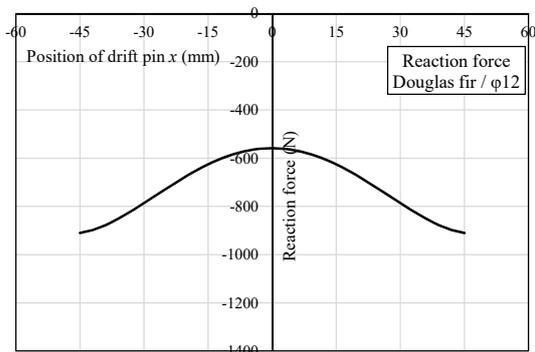
解析モデル図



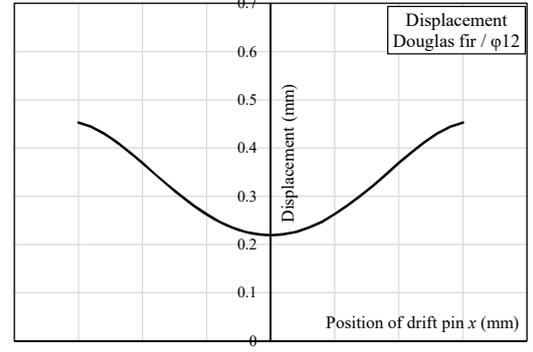
モーメント図



せん断力図

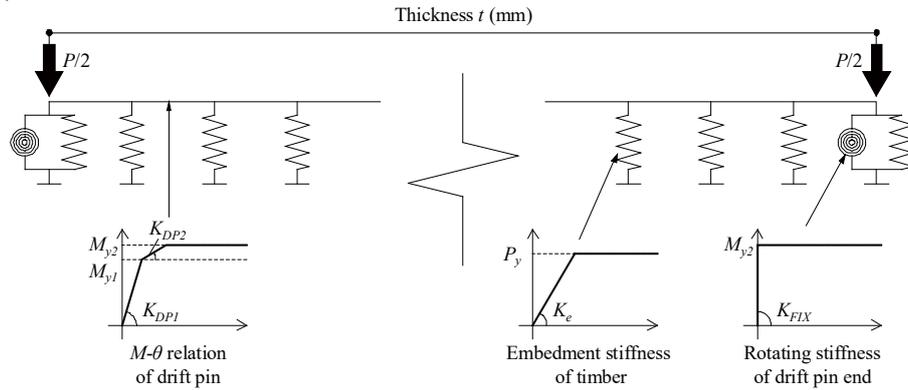


反力図



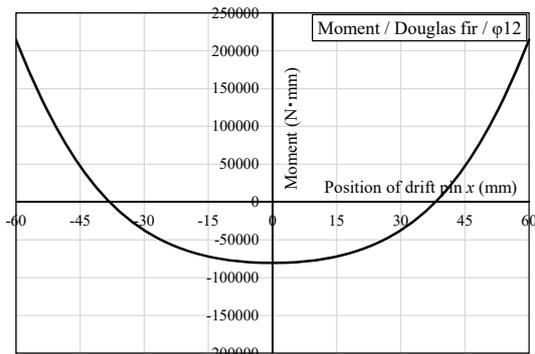
変位図

B12A の解析

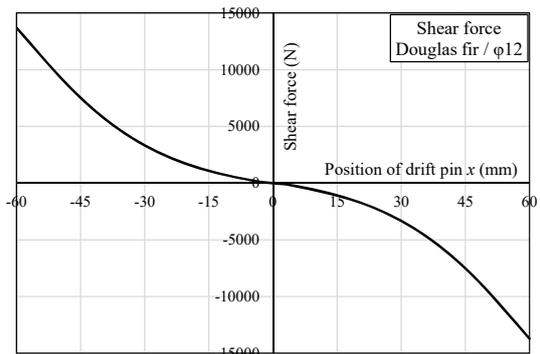


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	120	910.7	432.8	28.71	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

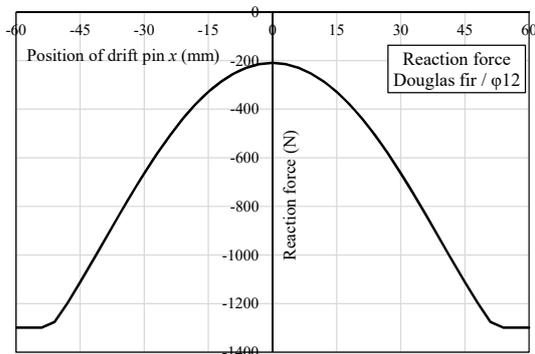
解析モデル図



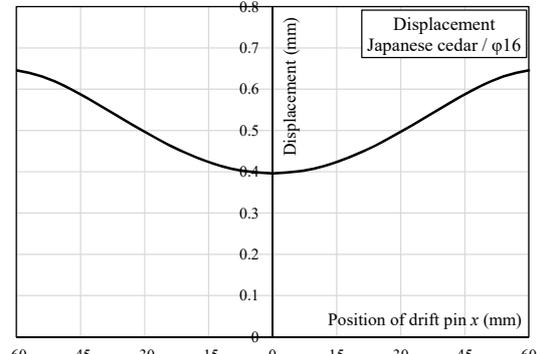
モーメント図



せん断力図



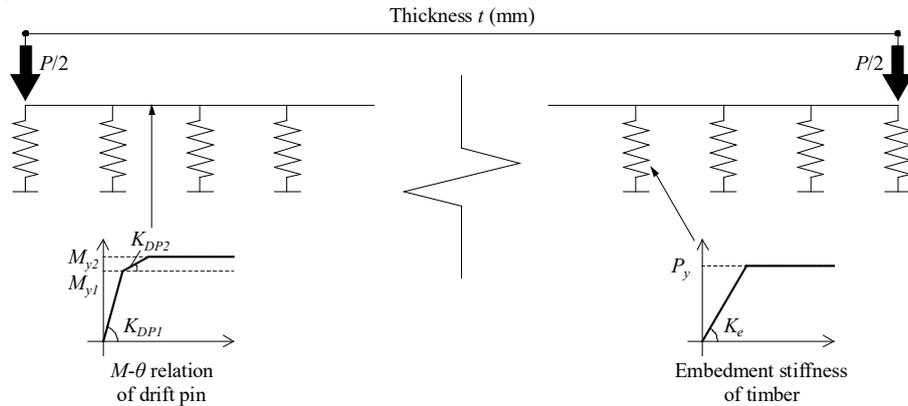
反力図



変位図

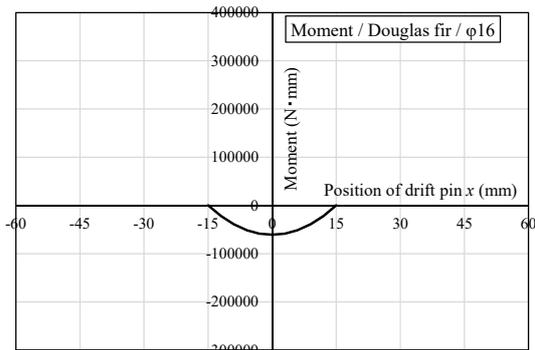
B-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16

B16Q の解析

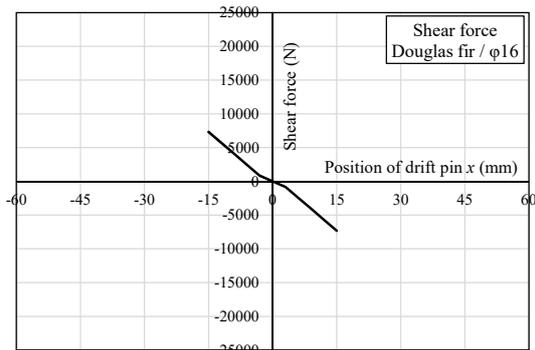


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	30	910.7	542.0	16.26	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

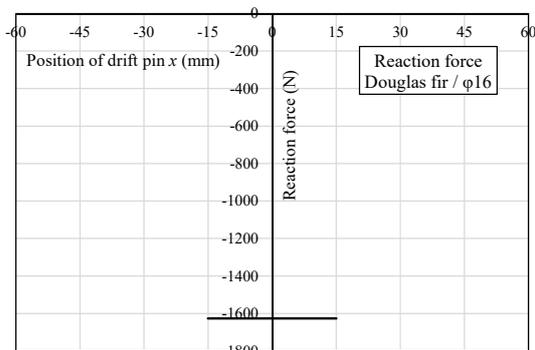
解析モデル図



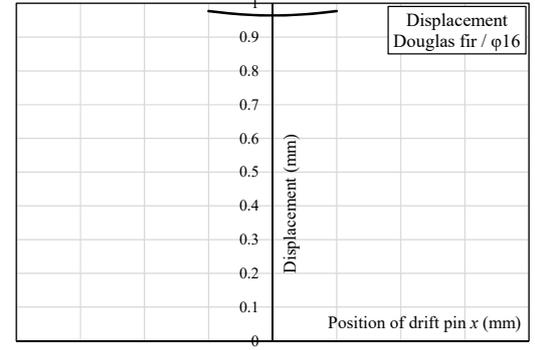
モーメント図



せん断力図

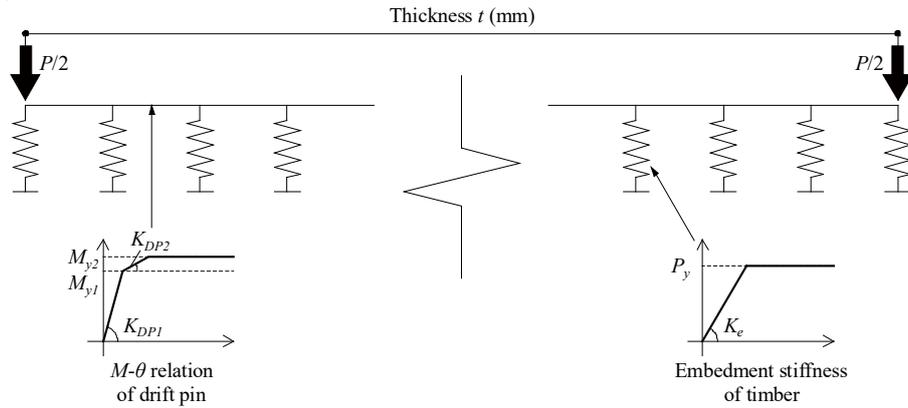


反力図



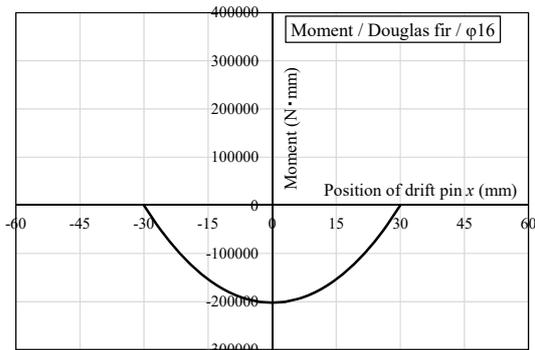
変位図

B16T の解析

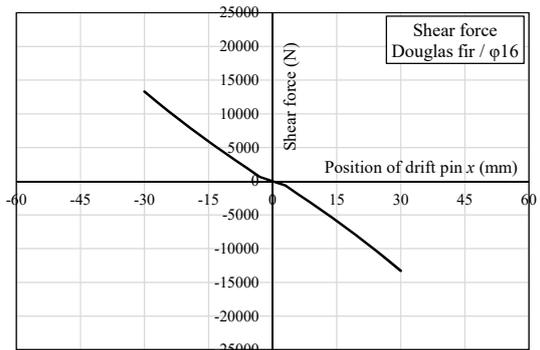


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	60	910.7	542.0	28.22	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

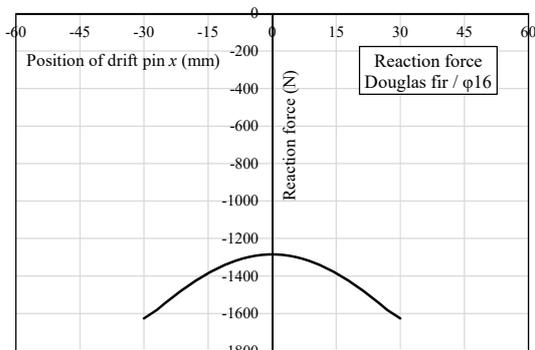
解析モデル図



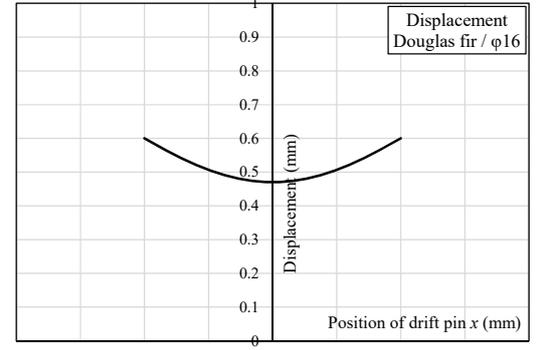
モーメント図



せん断力図

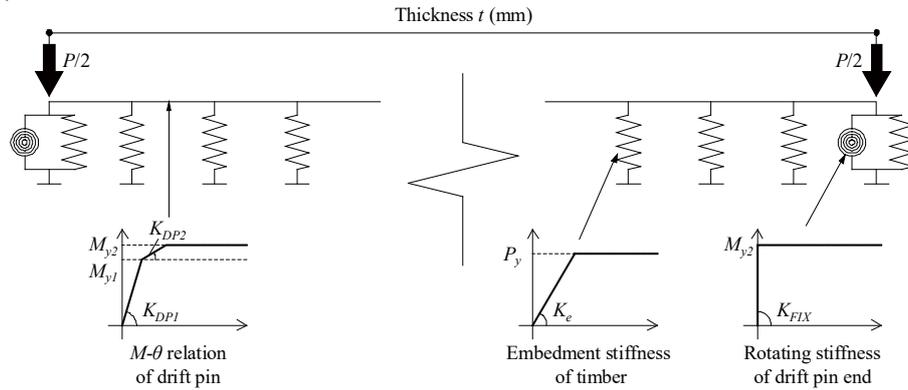


反力図



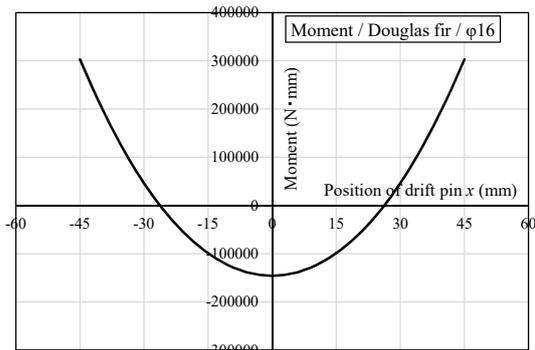
変位図

B16W の解析

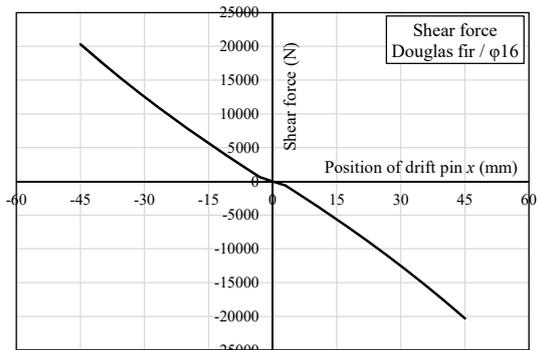


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	90	910.7	542.0	42.19	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

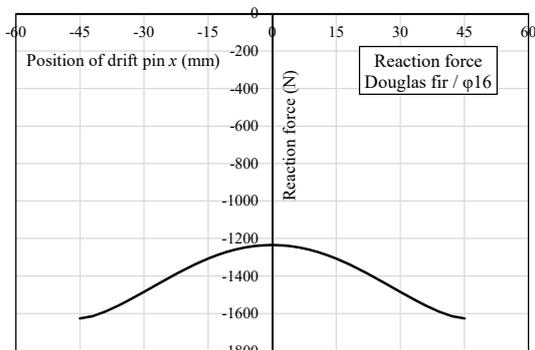
解析モデル図



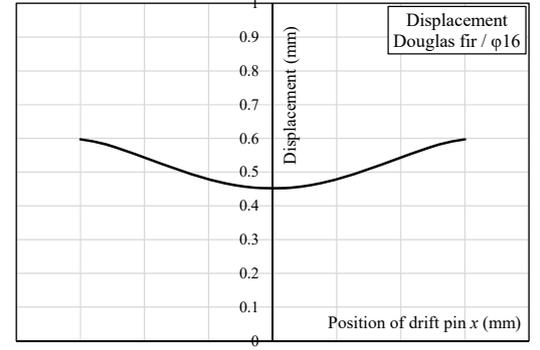
モーメント図



せん断力図

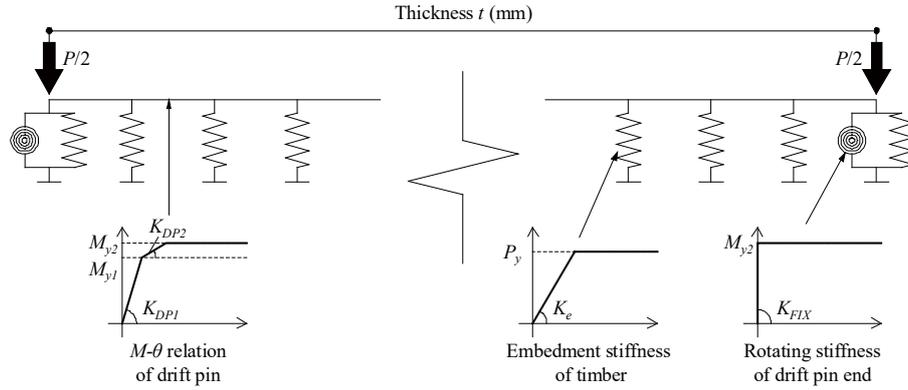


反力図



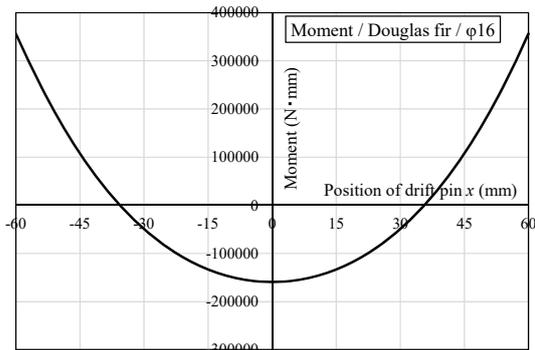
変位図

B16A の解析

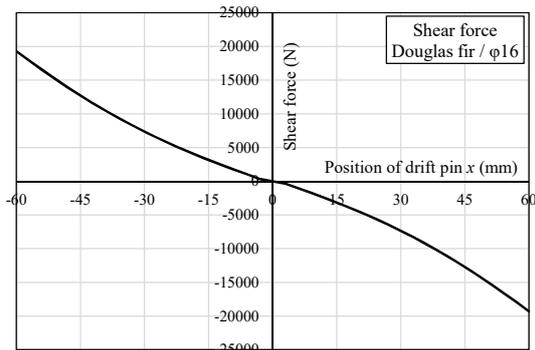


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	120	910.7	542.0	39.99	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

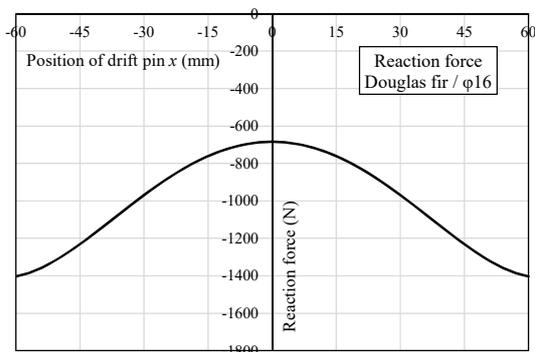
解析モデル図



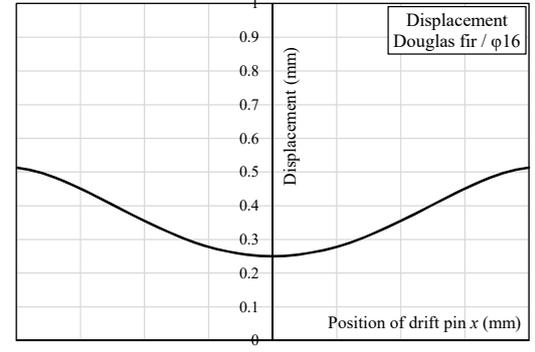
モーメント図



せん断力図



反力図

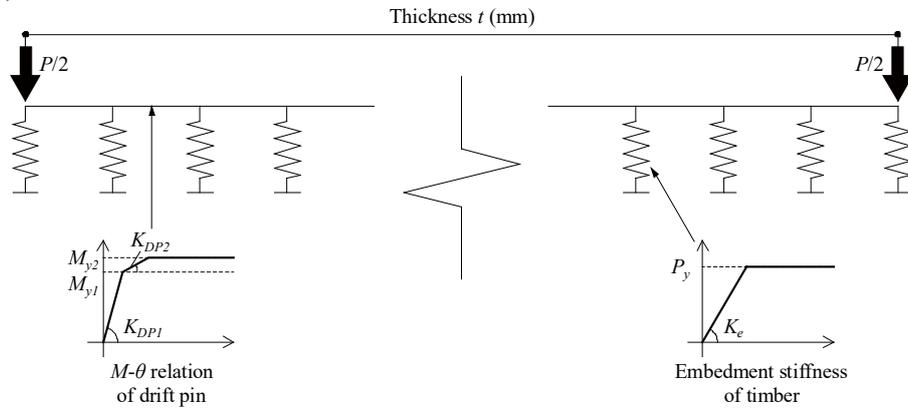


変位図

C) 縦割裂耐力推定 解析結果一覧

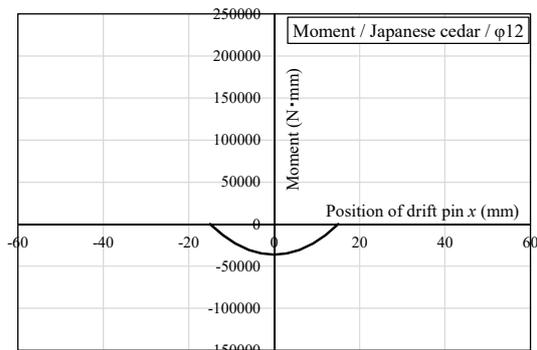
C-1) 母材：スギ ドリフトピン径：φ12

スギ ドリフトピン φ12 材厚 30mm の解析

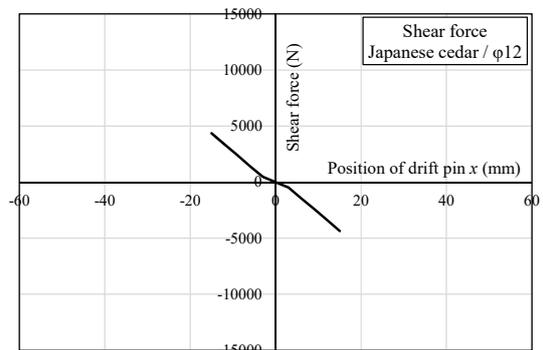


Wood species	Timber				Drift pin				
	Thickness	Embedment stiffness of timber	Yield embedment strength	Load at splitting	Diameter of drift pin	1st yield moment	2nd yield moment	Initial stiffness	Secondary stiffness
	t (mm)	K_e (N/mm ²)	P_y (N/mm)	P (kN)	d (mm)	M_{y1} (N·mm)	M_{y2} (N·mm)	K_{DP1} (N·mm ²)	K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	30	587.3	329.8	9.70	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

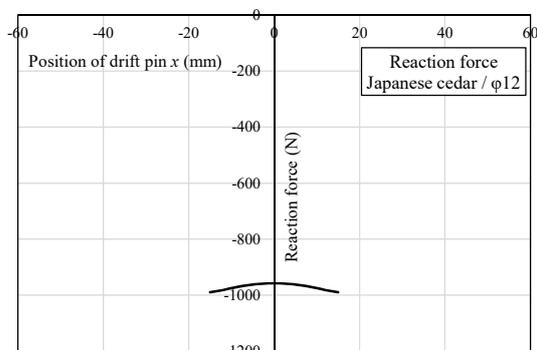
解析モデル図



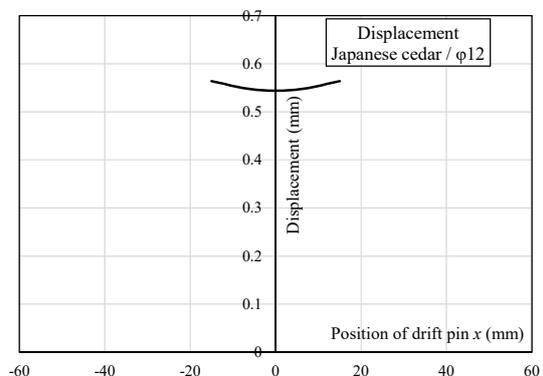
モーメント図



せん断力図

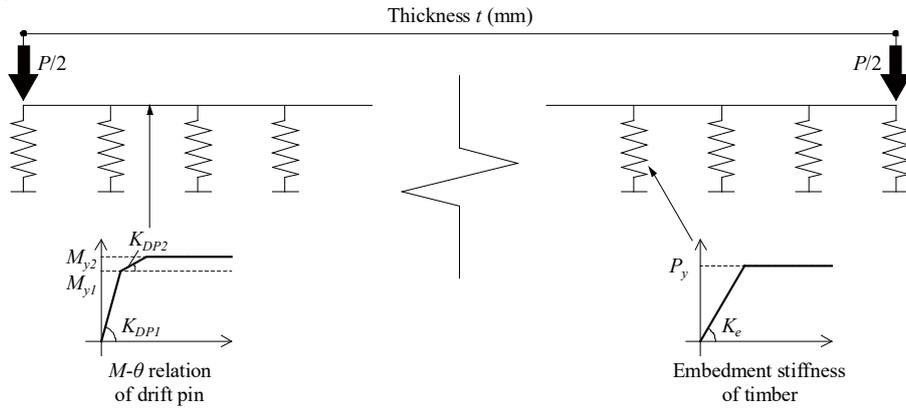


反力図



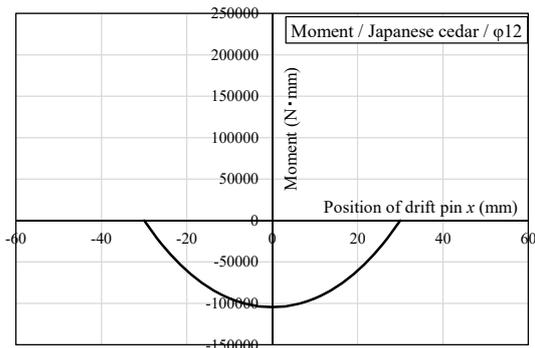
変位図

スギ ドリフトピン φ12 材厚 60mm の解析

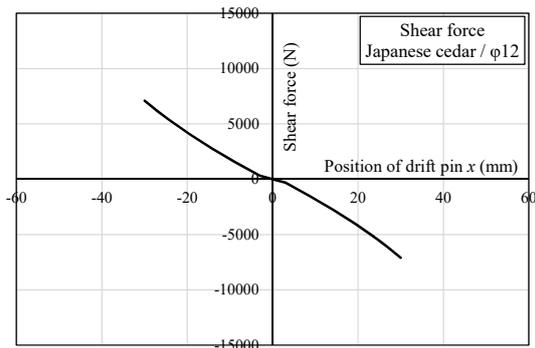


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	60	587.3	329.8	15.20	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

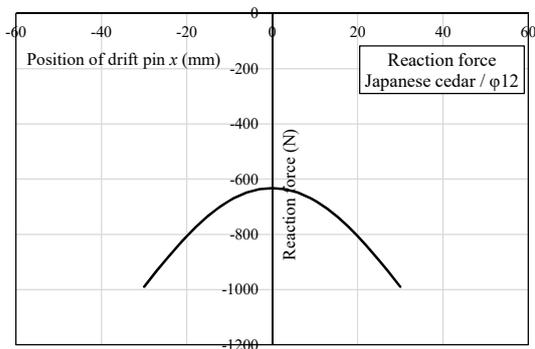
解析モデル図



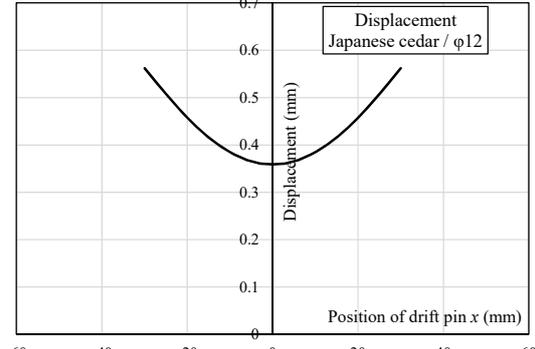
モーメント図



せん断力図

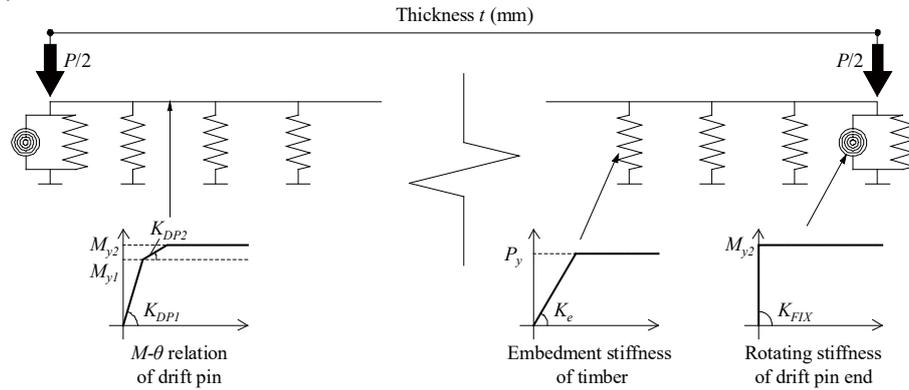


反力図



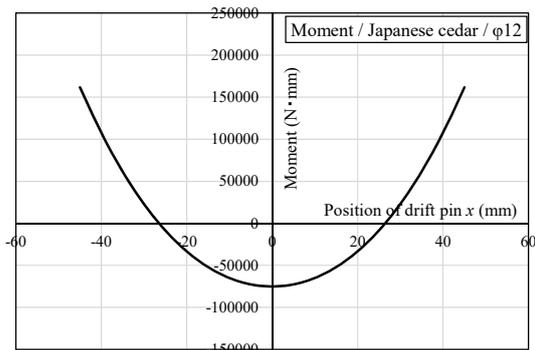
変位図

スギ ドリフトピンφ12 材厚 90mm の解析

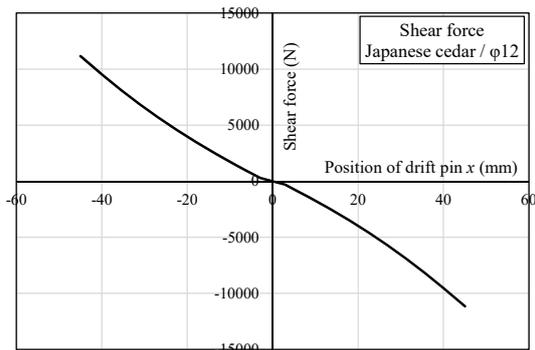


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	90	587.3	329.8	23.30	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

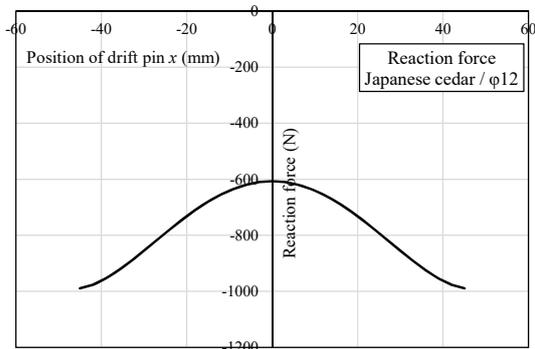
解析モデル図



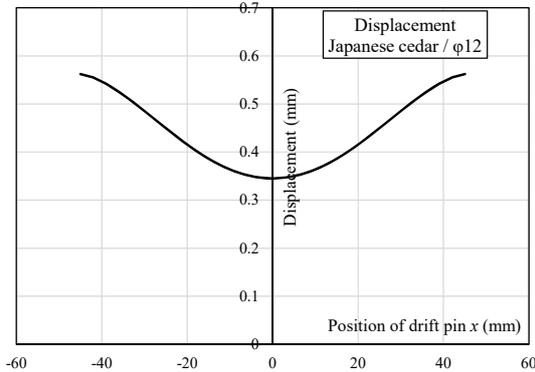
モーメント図



せん断力図

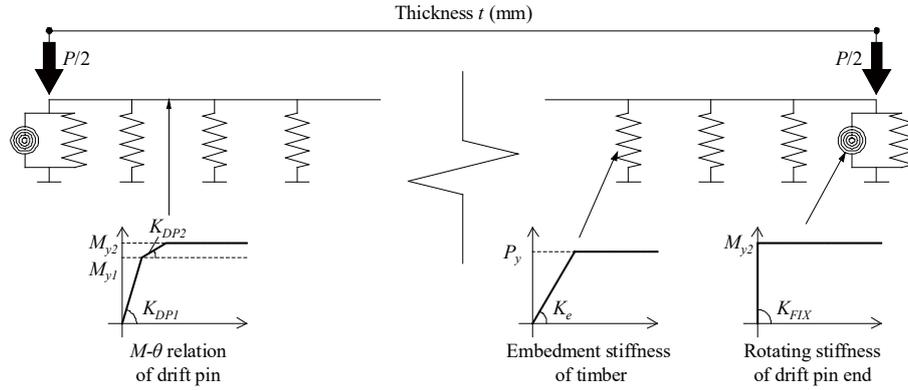


反力図



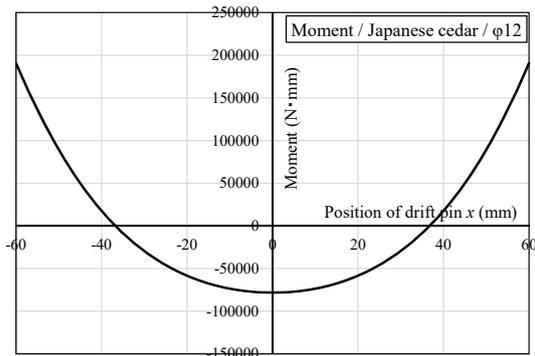
変位図

スギ ドリフトピンφ12 材厚 120mm の解析

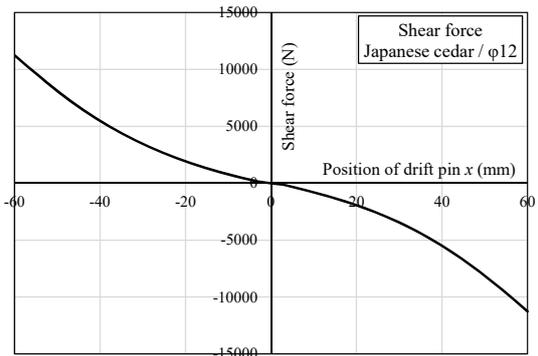


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	120	587.3	329.8	23.60	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

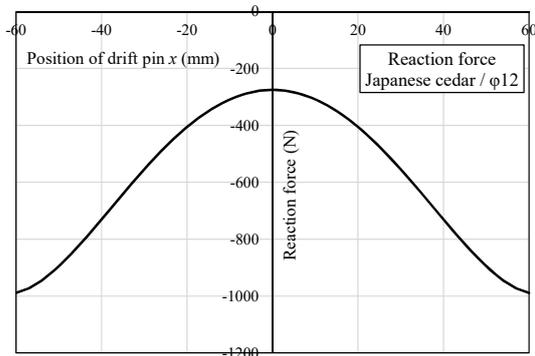
解析モデル図



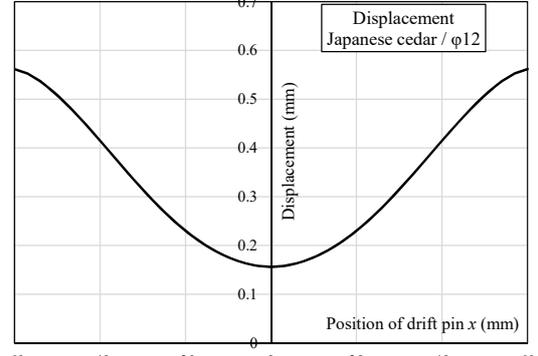
モーメント図



せん断力図

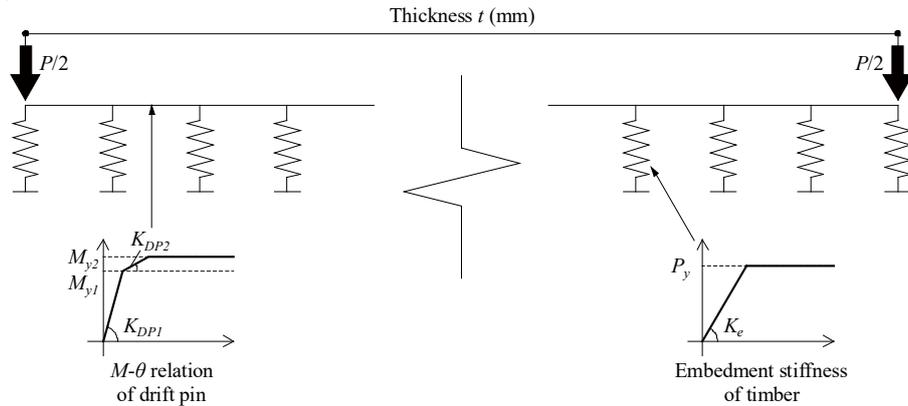


反力図



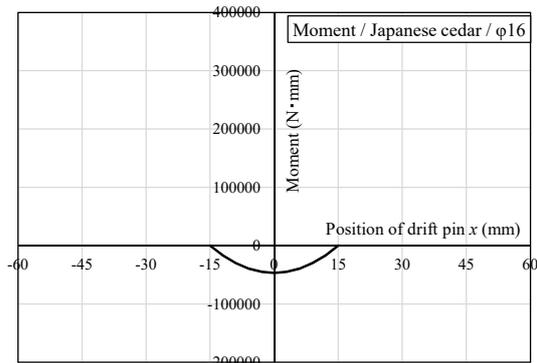
変位図

C-2) 母材：スギ ドリフトピン径：φ16
スギ ドリフトピンφ16 材厚 30mm の解析

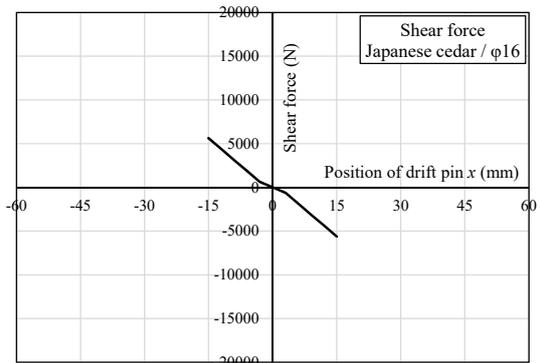


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	30	587.3	418.1	12.50	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

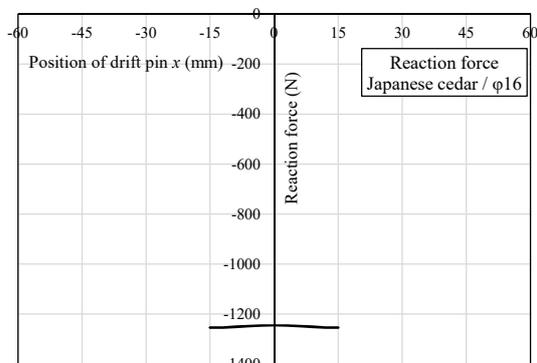
解析モデル図



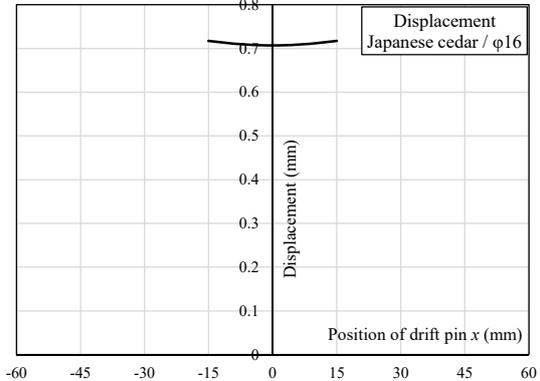
モーメント図



せん断力図

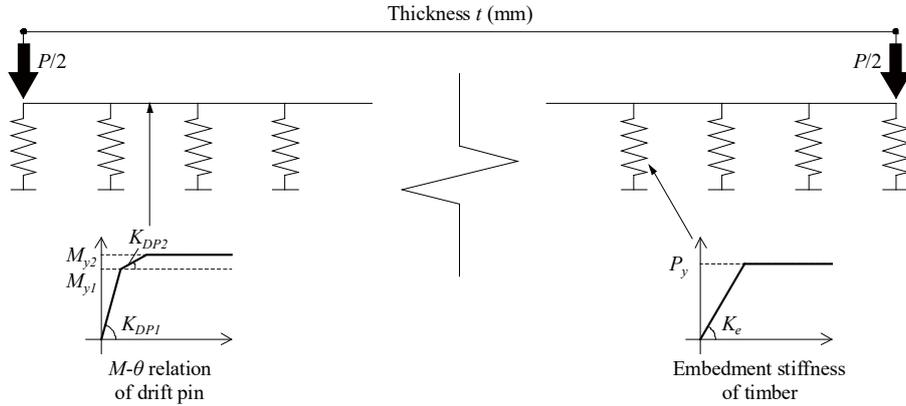


反力図



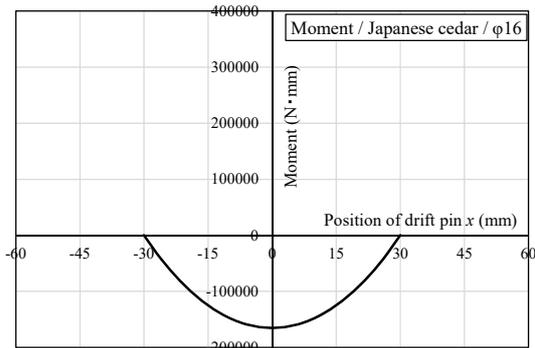
変位図

スギ ドリフトピンφ16 材厚 60mm の解析

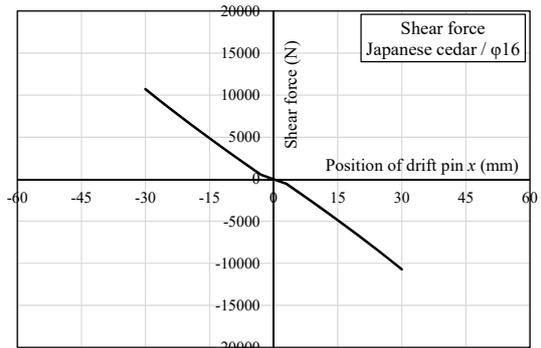


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	60	587.3	418.1	22.70	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

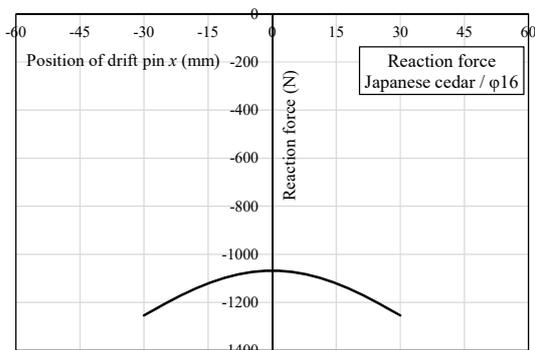
解析モデル図



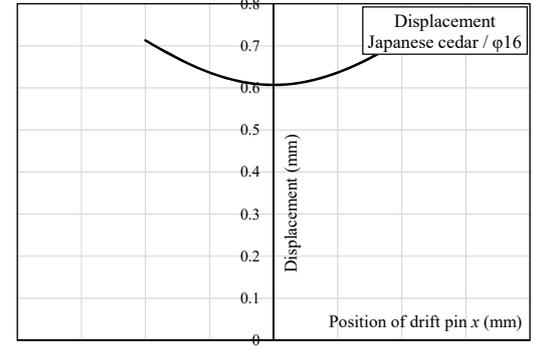
モーメント図



せん断力図

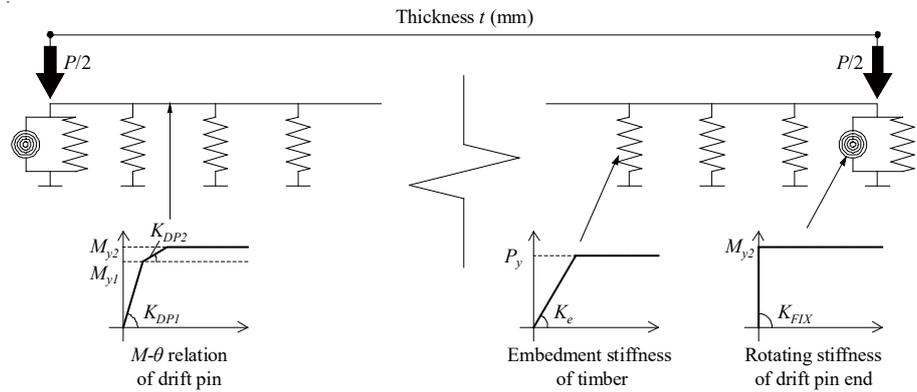


反力図



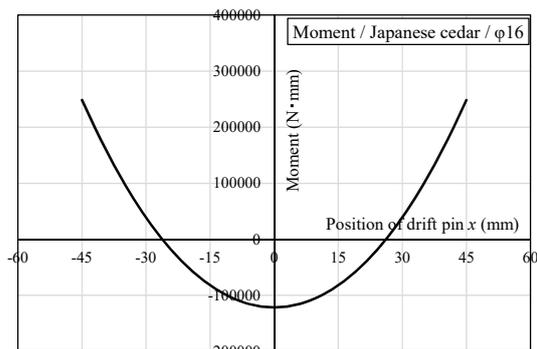
変位図

スギ ドリフトピンφ16 材厚90mmの解析

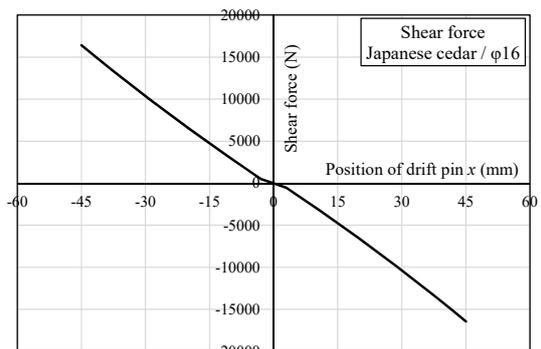


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	90	587.3	418.1	34.10	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

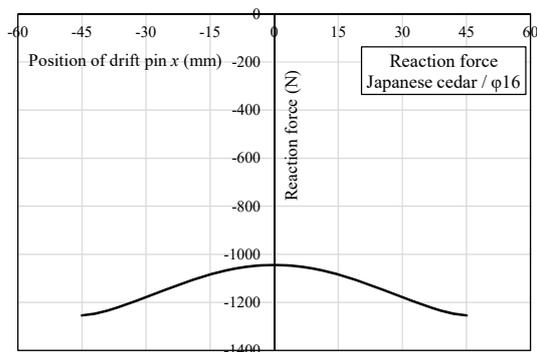
解析モデル図



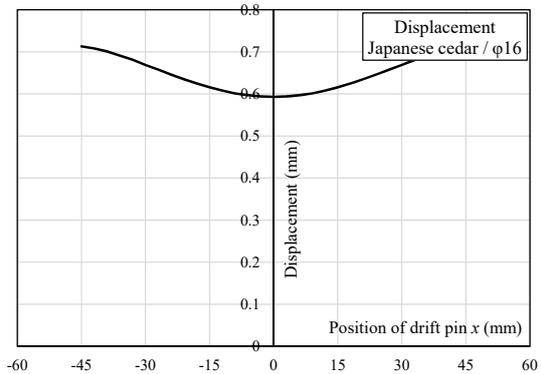
モーメント図



せん断力図

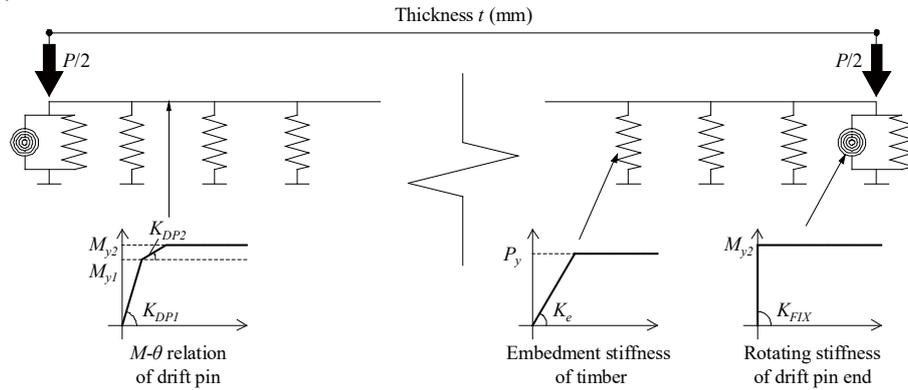


反力図



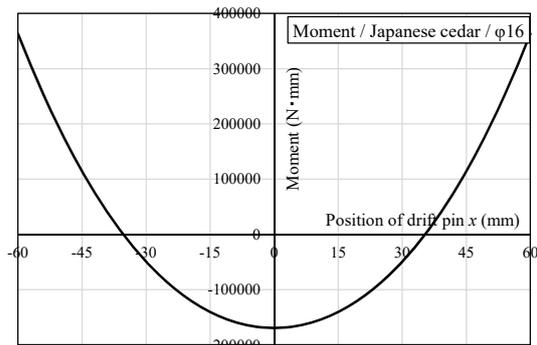
変位図

スギ ドリフトピンφ16 材厚 120mm の解析

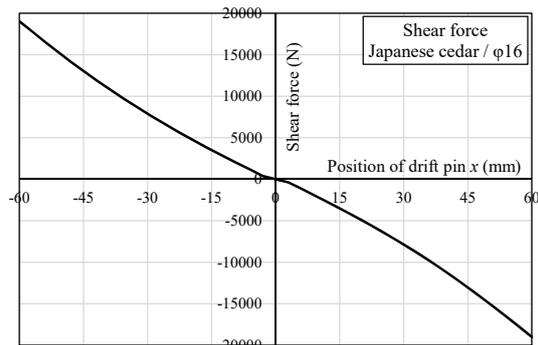


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Japanese cedar	120	587.3	418.1	39.30	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

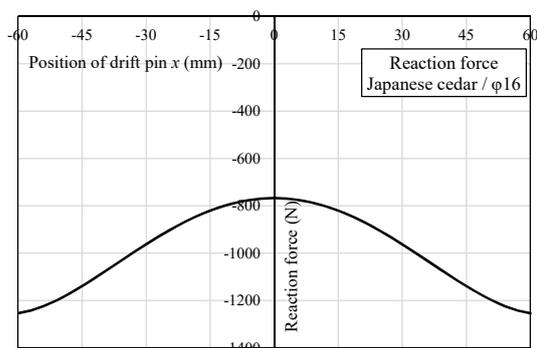
解析モデル図



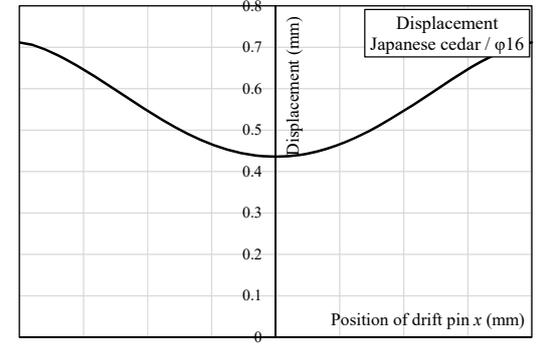
モーメント図



せん断力図



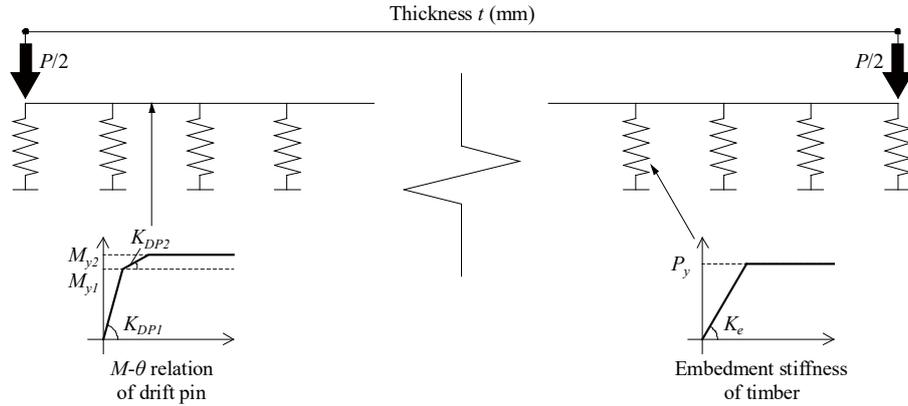
反力図



変位図

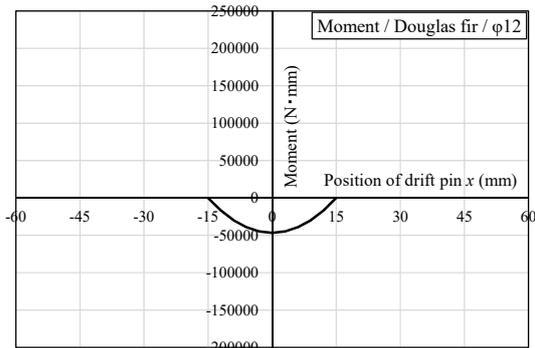
C-3) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ12

ベイマツ ドリフトピンφ12 材厚 30mm の解析

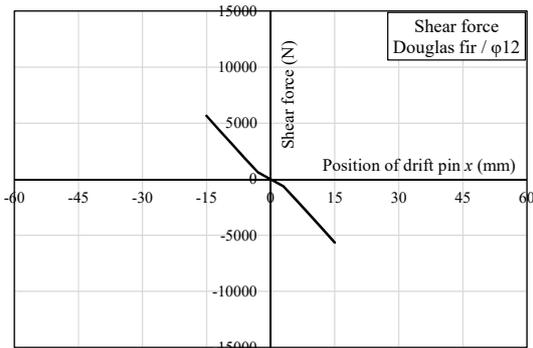


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	30	910.7	432.8	12.60	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

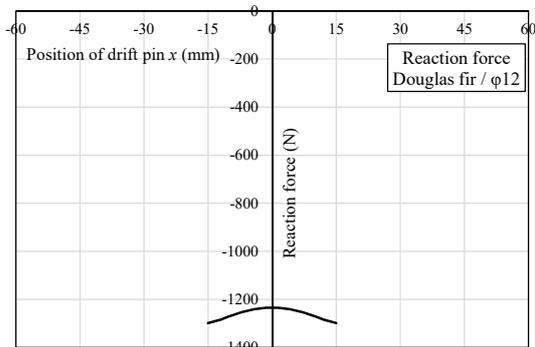
解析モデル図



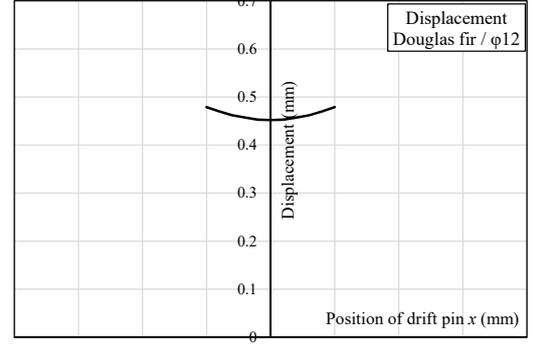
モーメント図



せん断力図

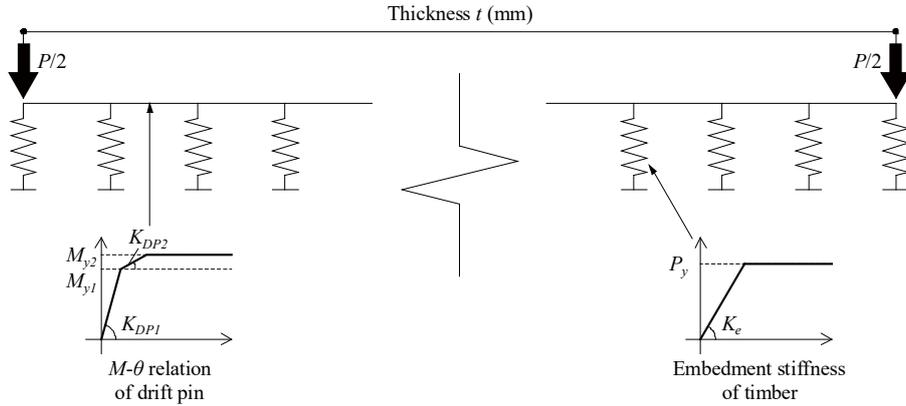


反力図



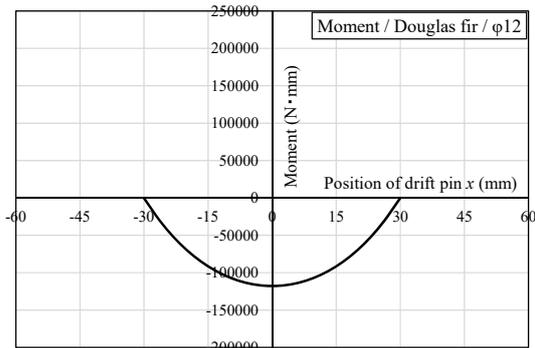
変位図

バイマツ ドリフトピン φ12 材厚 60mm の解析

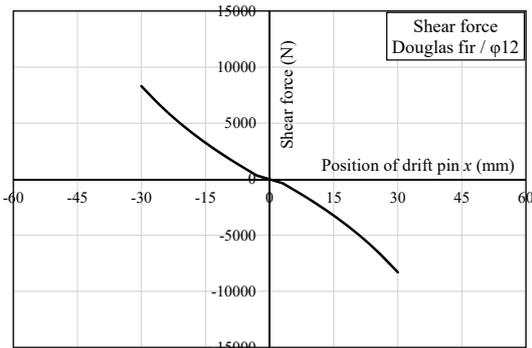


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	60	910.7	432.8	17.90	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

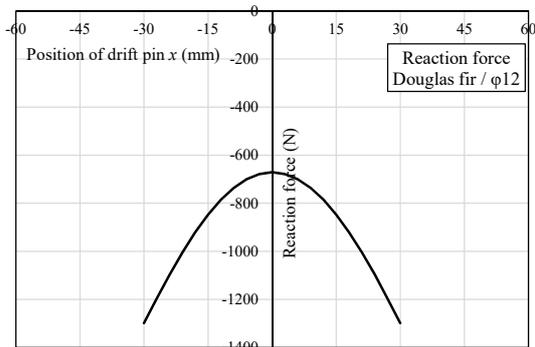
解析モデル図



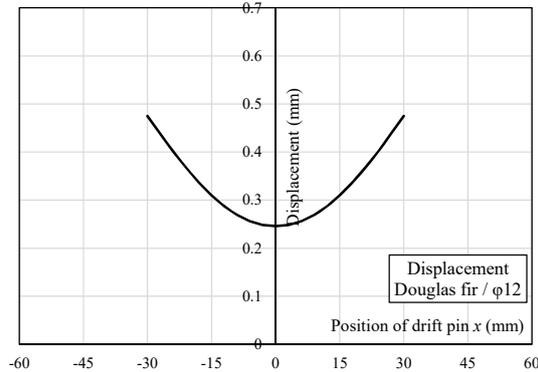
モーメント図



せん断力図

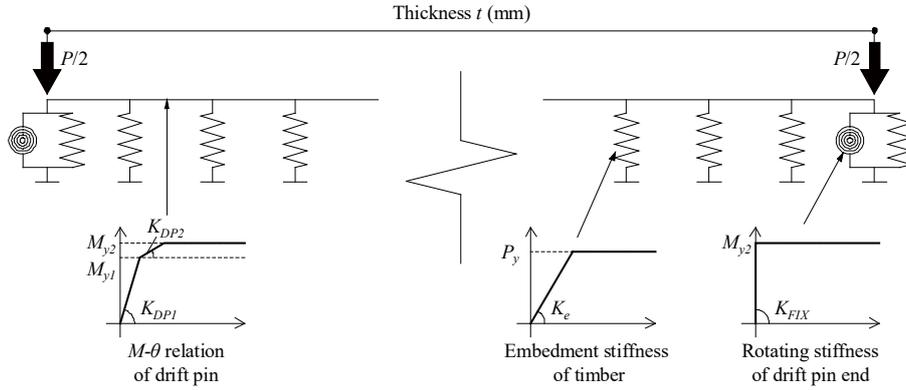


反力図



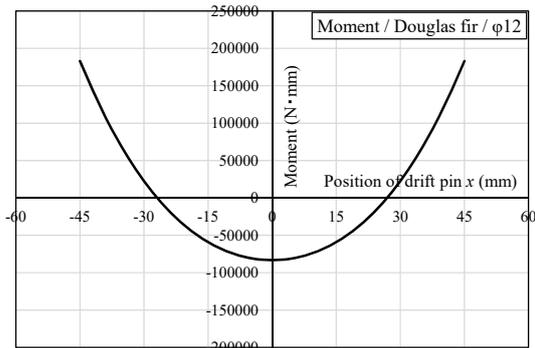
変位図

ベイマツ ドリフトピン φ12 材厚 90mm の解析

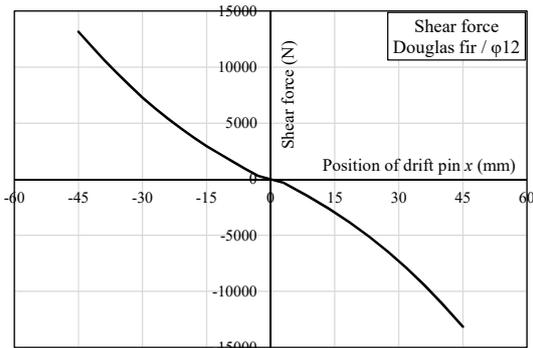


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	90	910.7	432.8	27.60	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

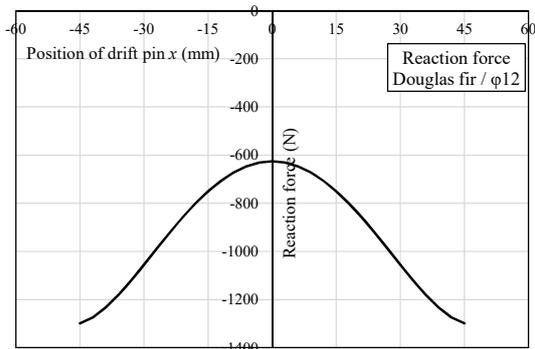
解析モデル図



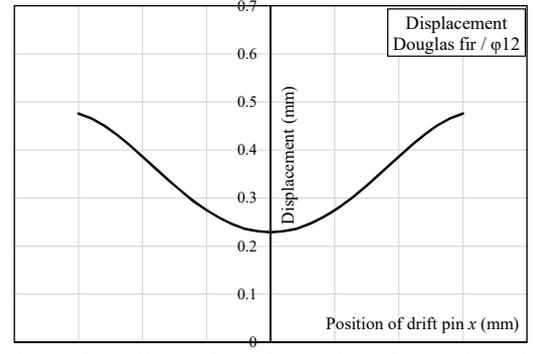
モーメント図



せん断力図

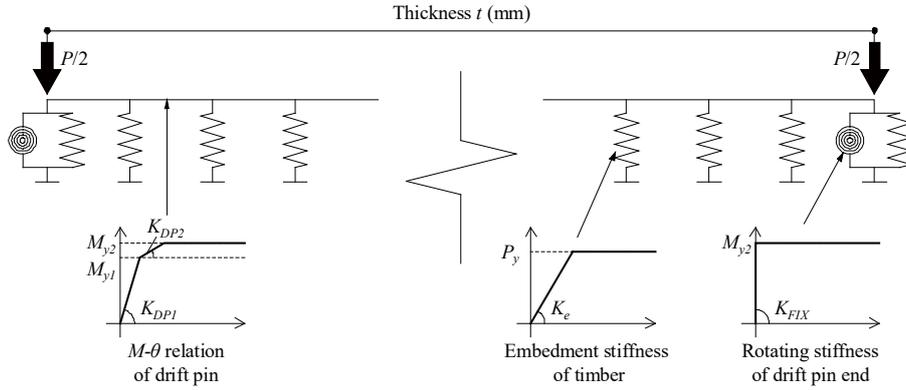


反力図



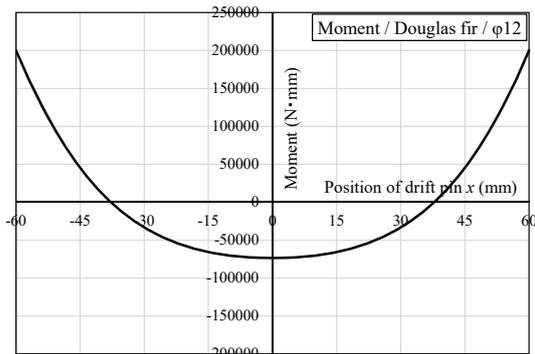
変位図

ベイマツ ドリフトピン φ12 材厚 120mm の解析

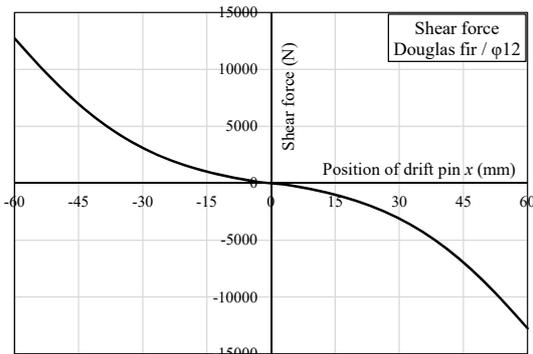


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	120	910.7	432.8	26.80	12	164711	245943	EI	$0.16 \cdot EI$

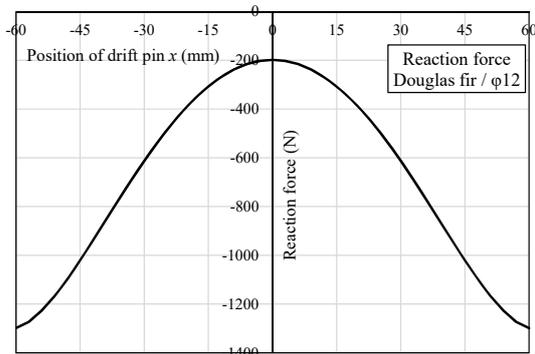
解析モデル図



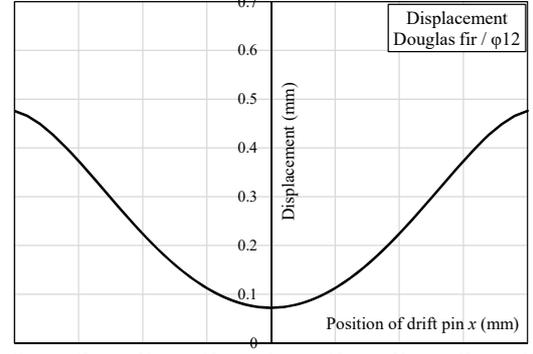
モーメント図



せん断力図



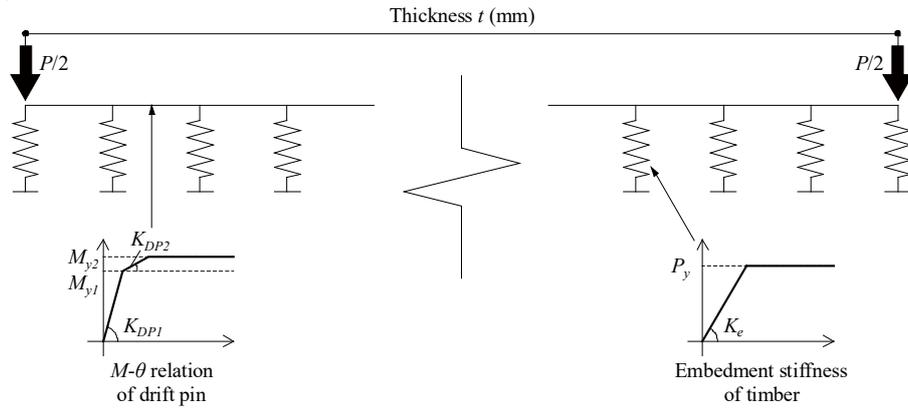
反力図



変位図

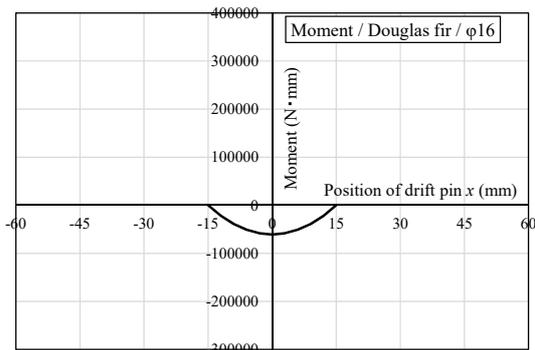
C-4) 母材：ベイマツ ドリフトピン径：φ16

ベイマツ ドリフトピンφ16 材厚 30mm の解析

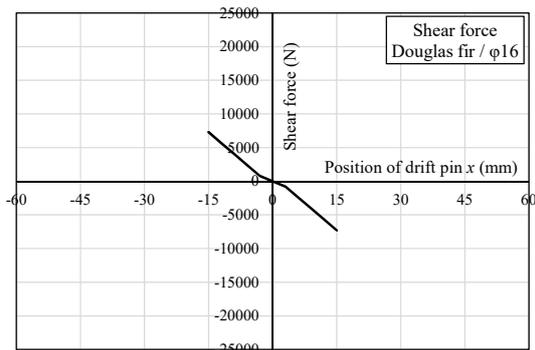


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	30	910.7	542.0	16.20	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

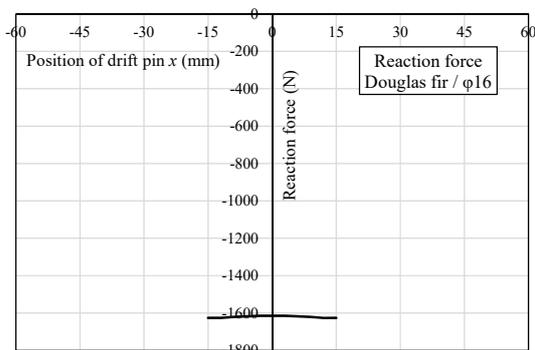
解析モデル図



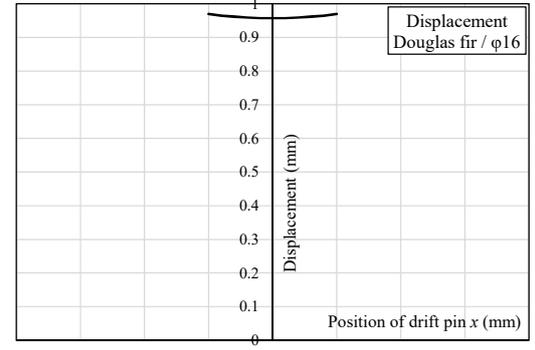
モーメント図



せん断力図

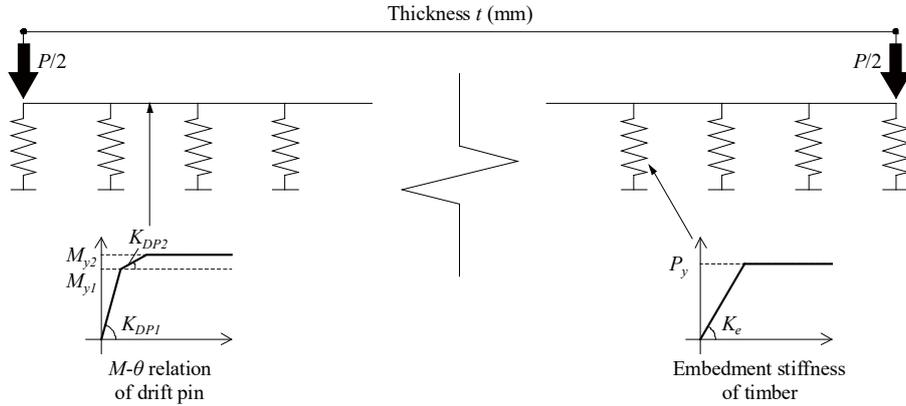


反力図



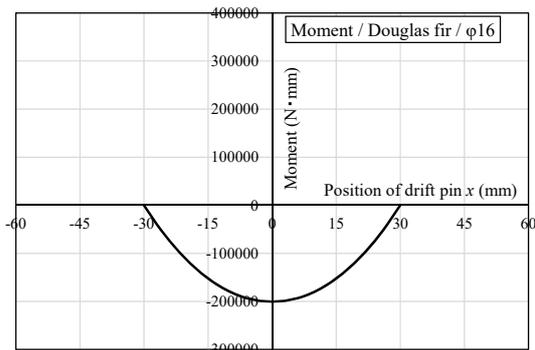
変位図

ベイマツ ドリフトピン φ16 材厚 60mm の解析

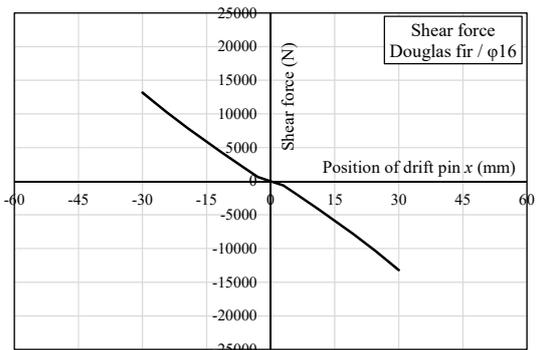


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	60	910.7	542.0	28.00	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

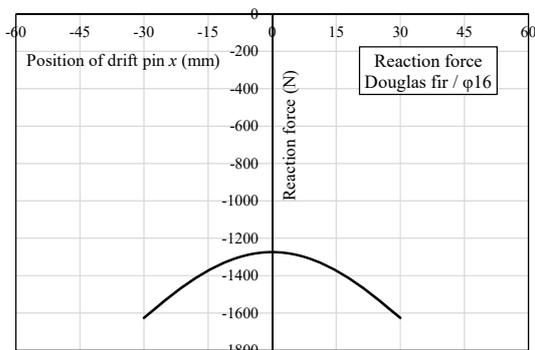
解析モデル図



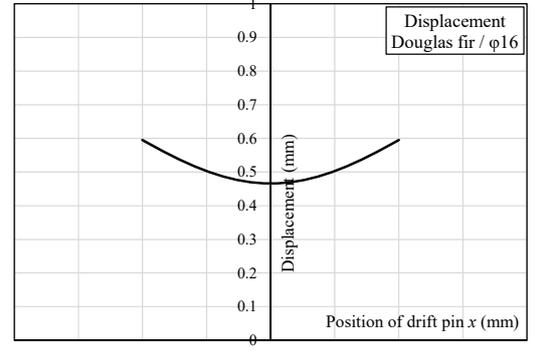
モーメント図



せん断力図

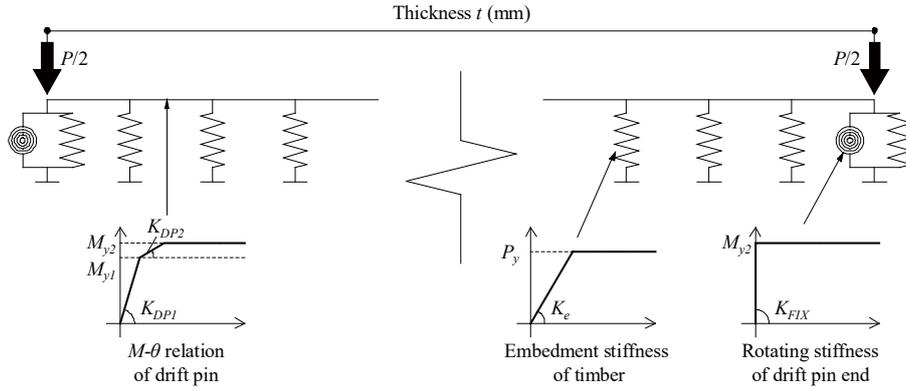


反力図



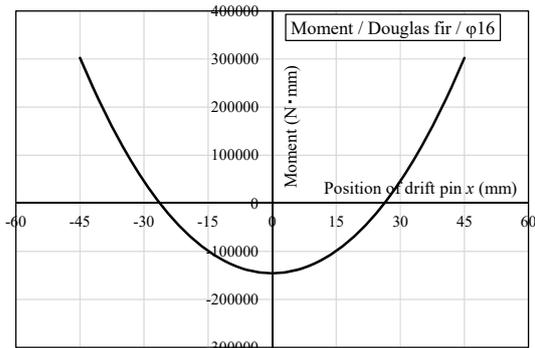
変位図

ベイマツ ドリフトピン φ16 材厚 90mm の解析

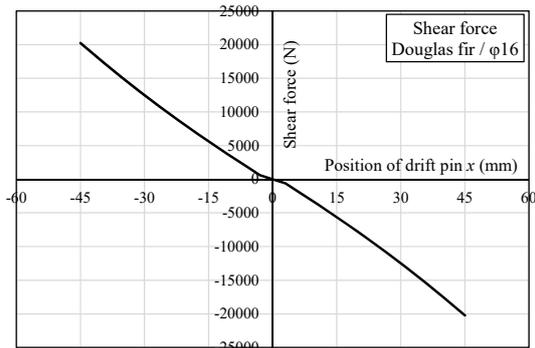


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	90	910.7	542.0	42.10	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

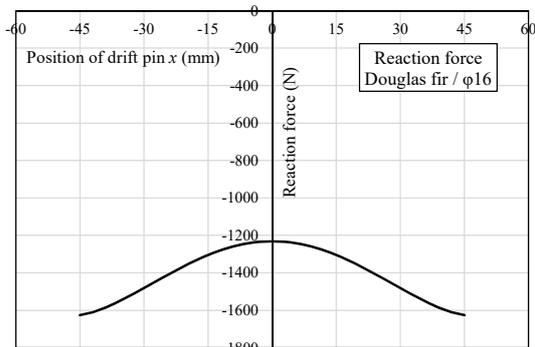
解析モデル図



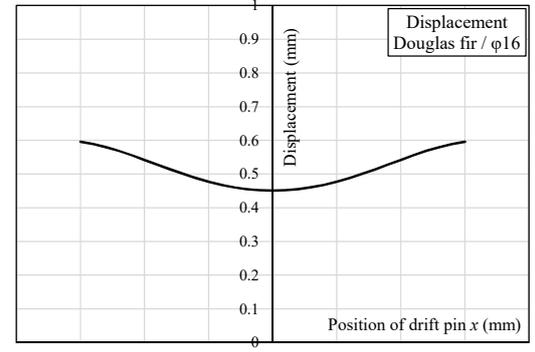
モーメント図



せん断力図

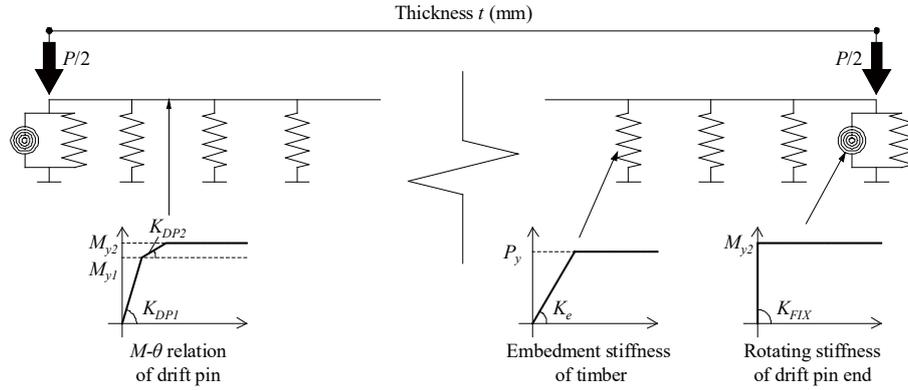


反力図



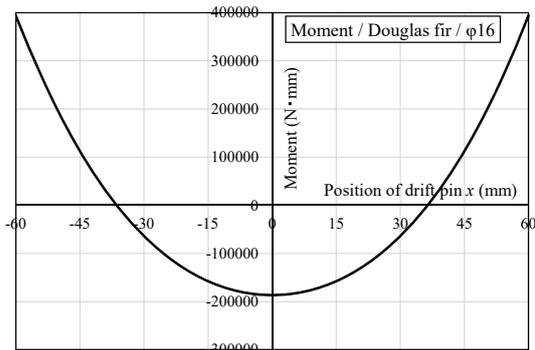
変位図

ベイマツ ドリフトピン φ16 材厚 120mm の解析

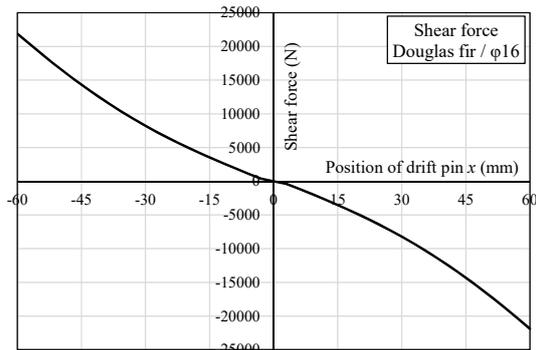


Timber					Drift pin				
Wood species	Thickness t (mm)	Embedment stiffness of timber K_e (N/mm ²)	Yield embedment strength P_y (N/mm)	Load at splitting P (kN)	Diameter of drift pin d (mm)	1st yield moment M_{y1} (N·mm)	2nd yield moment M_{y2} (N·mm)	Initial stiffness K_{DP1} (N·mm ²)	Secondary stiffness K_{DP2} (N·mm ²)
Douglas fir	120	910.7	542.0	45.40	16	360793	500231	EI	$0.03 \cdot EI$

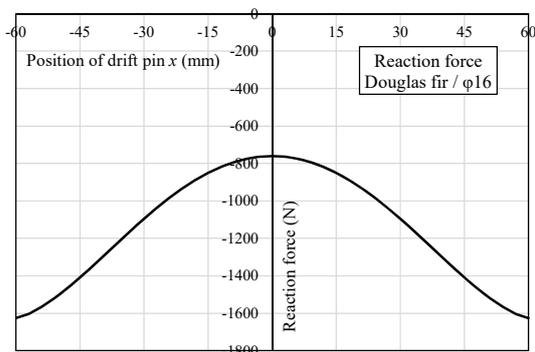
解析モデル図



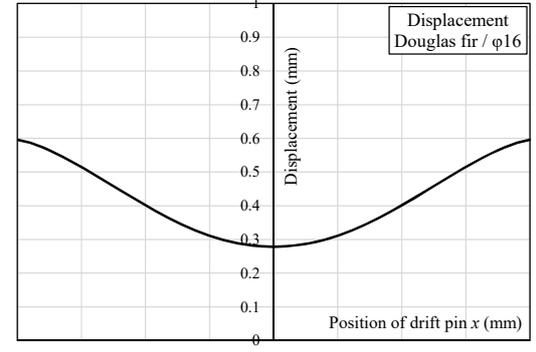
モーメント図



せん断力図



反力図



変位図